

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní



DIPLOMOVÁ PRÁCE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program M2301 – Strojní inženýrství

Strojírenské technologie
zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

**Návrh opatření pro zajištění možnosti vytlačování svařovacích drátů z
Polyamidu na univerzálním vytlačovacím stroji**

**The draft of measures for assuring possibilities of extrusion welding
wires from a polyamide on a universal extruder.**

Adam Chvojka

KSP – TP – 804

Vedoucí diplomové práce: Ing. Aleš Ausperger, Ph.D. – *TU v Liberci*
Konzultant diplomové práce: Ing. Karel Sedláček – *ANAH + SK s r.o.*

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	62
Počet tabulek	5
Počet příloh	3
Počet obrázků	40

Zadání

Anotace

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: M2301 – Strojní inženýrství

Diplomant: Adam Chvojka

Téma práce: Návrh opatření pro zajištění možnosti vytlačování svařovacích drátů z polyamidu na univerzálním vytlačovacím stroji

The draft of measures for assuring possibilities of extrusion welding wires from a polyamide on a universal extruder.

Číslo DP: KSP–TP–804

Vedoucí DP: Ing. Aleš Ausperger, Ph.D. – *TU v Liberci*

Konzultant: Ing. Karel Sedláček – *ANAH + SK s r.o.*

Abstrakt:

Předmětem této práce je optimalizace univerzálního vytlačovacího stroje, který má sloužit k vytlačování svařovacích drátů z polyamidu. Řešení takového problému bude především závislé na vlastnostech zpracovávaného polymeru. Při návrhu se postupovalo podle dostupných poznatků, doporučených konstrukčních zásad a rovnic použitelných pro určení rozměrů.

Abstract:

The subject matter of this diploma thesis is the optimalization of an universal extruder, which should be used to an extrusion of welding wires from a polyamide. This problem solving will be mainly depending on the characteristics of a worked polymer. In-process was progressed according to accessible knowledges, recommended structural principles and quadratics applicable to the proportions determination.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 23. Května 2008

.....
Adam Chvojka
Rožkova ul. 1527
530 02 Pardubice

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat zejména vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Aleši Auspergerovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky a za poskytnutí studijních materiálů; panu Ing. Luboši Běhálkovi za pomoc při experimentu v laboratoři KPT.

Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům za celoživotní podporu za každé okolnosti. Bez této pomoci bych svojí diplomovou práci nedokončil.



Obsah

Seznam obrázků.....	7
Seznam tabulek.....	8
Seznam použitých symbolů a zkratk.....	9
1 Úvod	11
2 Teoretická část	12
2.1 Vytlačování termoplastů [1]	12
2.2 Popis šnekového vytlačovacího stroje [1,2]	12
2.3 Popis šneku a jeho geometrie [1,2,3]	14
2.3.1 Geometrie standardního šneku [4,5].....	18
2.4 Vliv drážkovaného válce ve vstupní zóně vytlačovacího stroje	23
2.5 Materiály používané na výrobu šneků a povrchové úpravy [9]	24
2.6 Popis pochodů v plastifikační jednotce	25
2.6.1 Popis průchodu materiálu vstupní sekci [2,4]	26
2.6.2 Popis tavení v kompresní sekci šneku [6].....	29
2.6.3 Popis chování taveniny ve výstupní sekci [5,8]	32
2.7 Teoretický návrh optimální geometrie šneku [3]	34
2.8 Vlastnosti polyamidu	42
2.8.1 Charakteristika polyamidu	42
2.8.2 Potíže spojené s vlastnostmi polymeru [12]	43
2.8.3 Potíže spojené s vytlačovacím procesem [12].....	44
3 Experimentální část	47
3.1 Základní technické údaje vytlačovacího stroje [13].....	47
3.1.1 Zkouška vytlačování PA původním šnekem:	50
3.2 Řešení stávajícího problému	51
3.2.1 Údaje o vytlačovaném materiálu	52
3.2.2 Stanovení tokových křivek	53
3.2.3 Optimalizace geometrie	57
3.3 Výsledné rozměry šneku	61
4 Diskuze výsledků	65
5 Závěr.....	66
Použitá literatura.....	67
Seznam příloh.....	68



Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma jednošnekového vytlačovacího stroje	13
Obr. 2 Třísekční vytlačovací šnek	15
Obr. 3: Mailleferův bariérový šnek s neúplným dvojchodým závitem	15
Obr. 4 Dvouchodá dopravní sekce	16
Obr. 5 Šnek s proměnným stoupáním	16
Obr. 6 Šnek pro vytlačování kaučuku	17
Obr. 7 Mísící a torpédové sekce	17
Obr. 8 Bariérový šnek s dekompresní zónou a přídavnými díly [1]	18
Obr. 9 Základní geometrie šneku	18
Obr. 10 Délky jednotlivých sekcí	20
Obr. 11 Geometrie kanálů	21
Obr. 12 Závislost vytlačovaného množství na otáčkách	24
Obr. 13 Možnosti povrchových úprav šneku	25
Obr. 14 Koeficient tření v závislosti na teplotě	26
Obr. 15 Vektor rychlosti pevné látky v axiálním směru	27
Obr. 16 Rychlostní obrazec	27
Obr. 18 Porovnání vlastností obou polymerů [9]	30
Obr. 19 Změna šířky lůžka pevné látky [9]	31
Obr. 20 Homogenita taveniny [9]	31
Obr. 21 Charakteristika vytlačovacího stroje	33
Obr. 22 Průběh tlaku po délce šneku	33
Obr. 23 Optimální úhel stoupání šroubovice	36
Obr. 24 Axiální délka kompresní sekce versus úhel stoupání šroubovice ..	38
Obr. 25 Závislost kompresního poměru na délce kompresní sekce	39
Obr. 26 Srovnání původního šneku s optimalizovaným šnekem	42
Obr. 27: Viskozita polyamidu v závislosti na smykové rychlosti	44
Obr. 28 Rozdělení délky původního šneku	47
Obr. 29 Vytlačovací stroj Ø32, Typ 14071/ P2	48
Obr. 30 Uspořádání topných pásem stroje	48
Obr. 31 Používané profily vytlačovaných svařovacích drátů	50
Obr. 32 Grafická závislost viskozity na smykové rychlosti	52
Obr. 33 Graf závislosti $\log \tau = f(\log D)$ pro teplotu 270°C	54
Obr. 34 Graf závislosti $\log \tau = f(\log D)$ pro teplotu 290°C	55
Obr. 35 Geometrie kanálu	58
Obr. 36 Rozdělení délky optimalizovaného šneku	61
Obr. 37 Model optimalizovaného šneku pro PA	62
Obr. 38 Vstupní sekce	63
Obr. 39 Kompresní sekce	63
Obr. 40 Výstupní sekce	64



Seznam tabulek

Tab.1	Rozměry šneku používaného pro PP	47
Tab.2	Neměřené hodnoty při teplotě 290°C.....	54
Tab.3	Neměřené hodnoty při teplotě 270°C.....	54
Tab.4	Výsledné hodnoty reologický konstant.....	56
Tab.5	Rozměry optimalizovaného šneku	62



Seznam použitých symbolů a zkratk

označení	význam	jednotka
α	Úhel třecích poměrů	[°]
δ	Radiální vůle	[m]
ϕ	Koeficient tekutosti	[s ⁻¹]
η	Dynamická viskozita	[Pa.s]
φ	Stoupání šroubovice	[°]
τ	Smykové napětí	[Pa]
ρ_m	Hustota taveniny polymeru	[kg.m ⁻³]
ρ_s	Hustota polymeru v pevném stavu	[kg.m ⁻³]
A	Konstanta zahrnující geometrii šneku	[-]
A ₁	Komprese v axiálním směru	[m]
B	Konstanta zahrnující geometrii hlavy	[-]
d	Průměr jádra šneku	[m]
D	Smyková rychlost	[1/s]
D	Průměr šneku přes závit	[m]
e	Šířka závitu	[m]
g _a	Tlakový gradient v axiálním směru	[Pa.m ⁻¹]
g _z	Tlakový gradient ve směru kanálu	[Pa.m ⁻¹]
H _f	Hloubka kanálu dopravní sekce	[m]
H _m	Hloubka kanálu výstupní sekce	[m]
ΔH	Rozdíl entalpií	[J.kg ⁻¹]
k	Koeficient konzistence	[-]
k _m	Tepelná vodivost polyamidu	[J/ms°C]
L _f	Délka dopravní sekce	[m]
L _c	Délka kompresní sekce	[m]
L _m	Délka výstupní sekce	[m]
L	Délka trysky	[m]
m	Exponent mocninového zákona	[-]
\dot{M}	Dodávané hmotnostní množství	[kg.s ⁻¹]
n	Exponent mocninového zákona	[-]
N	Otáčky šneku	[s ⁻¹]
p	Počet chodů šneku	[-]
Δp	Tlakový spád po délce trysky	[Pa]
\dot{Q}	Objemové množství	[m ³ /hod]
r _{1,2}	Poloměry zaoblení	[m]
R	Poloměr trysky	[m]
S	Plocha průřezu kanálu	[m ²]
t	Rozteč	[m]
T _b	Teplota stěny válce	[C°]
T _m	Teplota tání polymeru	[C°]
ΔT	Rozdíl teplot	[C°]
v ₀	Obvodová rychlost šneku	[m.s ⁻¹]



označení	význam	jednotka
V_a	Rychlost dopravy materiálu	$[m.s^{-1}]$
V_s	Absolutní rychlost materiálu	$[m.s^{-1}]$
V_{sz}	Rychlost lůžka pevné látky	$[m.s^{-1}]$
V_r	Relativní rychlost materiálu	$[m.s^{-1}]$
w	Šířka závitů	$[m]$
\hat{w}	Redukovaná šířka ramene	$[m]$
W	Šířka kanálu	$[m]$
W_1	Počáteční šířka lůžka pevné látky	$[m]$
X_c	Hloubkový kompresní poměr	$[-]$
X_v	Objemový kompresní poměr	$[-]$
Z	Délka šnekového kanálu	$[m]$
PA	Polyamid	
PP	Polypropylen	
PS	Polystyren	

1 Úvod

Zpracování plastů patří v současné době mezi velmi rozšířené, resp. stále se rozšiřující průmyslové odvětví. Plasty se staly materiálem 20. století a v řadě oborů nahradily lidstvem dlouhá staletí používané materiály, jako jsou kovy, dřevo, keramika, sklo a mnoho dalších.

Svou oblibu si získali především pro svou dobrou zpracovatelnost a měrnou hmotnost. Zpracovávat se dají různými způsoby jako např. tvářením, obráběním, odléváním apod. Dnes nejvíce používanými způsoby zpracování plastů jsou vstřikování a vytlačování. Vstřikováním se vyrábí tvarově rozmanitá škála konstrukčních součástí, ale i velké množství spotřebního zboží.

Vytlačování je velice produktivní technologie, jelikož výrobní proces je kontinuální. Vyrábějí se tak tyče, profily, desky, trubky apod. Vytlačované díly mají vyšší mechanické vlastnosti než díly vstřikované, protože takto zpracovaný plast obsahuje znatelně nižší vnitřní pnutí, neboť je tavenina polymeru vytlačována do volného prostoru. Tavenina polymeru také není vystavena tak velkým smykovým napětím jako právě při vstřikování a délka makromolekul je tak větší. Zpracování polymeru probíhá v plastifikační jednotce.

Vytlačováním a konkrétně plastifikační jednotkou se zabývá tato diplomová práce. Na základě žádosti firmy ANAH + SK s r.o. byl řešen problém týkající se zajištění výroby polyamidových svařovacích drátů na univerzálním vytlačovacím stroji Ø32, Typ 14071/ P2.

Řešení vychází ze zkoušek provedených na univerzálním stroji opatřeným šnekem sloužícím pro vytlačování polypropylenu. Ze zkoušek vyplynulo, že se bude muset práce zaměřit na optimalizaci šneku.

Optimalizace takového šneku je činností značně náročnou, vyžadující dobré znalosti a zkušenosti v oboru. Návrh za pomoci matematických vzorců je dosti složitá záležitost, do této doby ne zcela sjednocená a dořešená, což vede často k rozdílným názorům na návrh geometrie.

V průmyslu se již používají počítačové programy sloužící k optimalizaci geometrie šneku. Tato metoda je však často nepřesná a mnohé šneky navržené za pomoci softwaru nepracují tak, jak by se předpokládalo.

Vodítkem této práce byly doposud zjištěné poznatky z oblasti vytlačování polyamidu, které byly publikovány.



2 Teoretická část

2.1 Vytlačování termoplastů [1]

Vytlačování patří k jednomu z nejrozšířenějších způsobů tváření plastů. Jedná se o proces kontinuální, kde je zplastifikovaná hmota vytlačována přes profilovací otvor (hubici) do volného prostoru. Nejčastěji se používá pro zpracování termoplastů a elastomerů. Jako vstupní materiál se používají granule, prach nebo drť recyklátu. Vytlačováním lze vyrábět profily s konstantním průřezem a to jednoduché profily, jako jsou tyče, desky, trubky nebo složité profily s mnoha komorami, např. profily pro výrobu plastových oken. Dále lze vytlačování použít k opláštování vodičů pro elektrotechniku, velké užití nachází také při výrobě granulátů a regranulátů polymerů.

Materiál je zpracováván ve vytlačovacím stroji (extruderu). Tlak, který je potřebný k překonání profilovacího otvoru je vyvolán otáčkami šneku, tlakem pístu, popř. otáčkami disku. V praxi se nejvíce uplatňují šnekové vytlačovací stroje. Pístové stroje jsou vhodné k vytlačování materiálů citlivých na teplotu, na druhou stranu u nich není splněna podmínka nepřetržitého procesu. Diskové stroje využívají tzv. Weissenbergova efektu, který souvisí s viskoelastickými vlastnostmi tavenin plastů. Mezi výhody patří rychlá plastikace a dobré odplynění, tlaky jsou však poměrně malé.

Dnes se v rostoucí míře používají dvoušnekové vytlačovací stroje, ve kterých pracují v komoře tvaru ležaté osmičky dva šneky otáčející se stejným směrem nebo protiběžně, přičemž závit šneků do sebe zapadají. Tyto stroje mají daleko větší míchací účinek než stroje jednošnekové. Nevýhodou těchto strojů je nepravidelnost dopravy taveniny.

Stroje, se tedy dělí jednak podle konstrukce na pístové, šnekové a diskové. A dále se mohou dělit na pomaloběžné a rychloběžné (kde je hraniční obvodová rychlost šneku $0,5 \text{ m.s}^{-1}$). U rychloběžných strojů se třením vyvíjí tak velké množství tepla, že stačí k roztavení hmoty a ohřev je potřebný pouze při rozběhu. Pomaloběžné stroje mají několik nezávislých topných pásem, kterými je ohříván válec a následně zpracováván materiál.

2.2 Popis šnekového vytlačovacího stroje [1,2]

Vytlačovací stroj nebo také extrudér je hlavním zařízením ve vytlačovacím procesu. Jeho hlavním úkolem je převést materiál v pevném stavu, během průchodu pracovním válcem, do stavu plastického. Na konci stroje před průchodem vytlačovací hlavou musí mít tavenina plastu potřebný

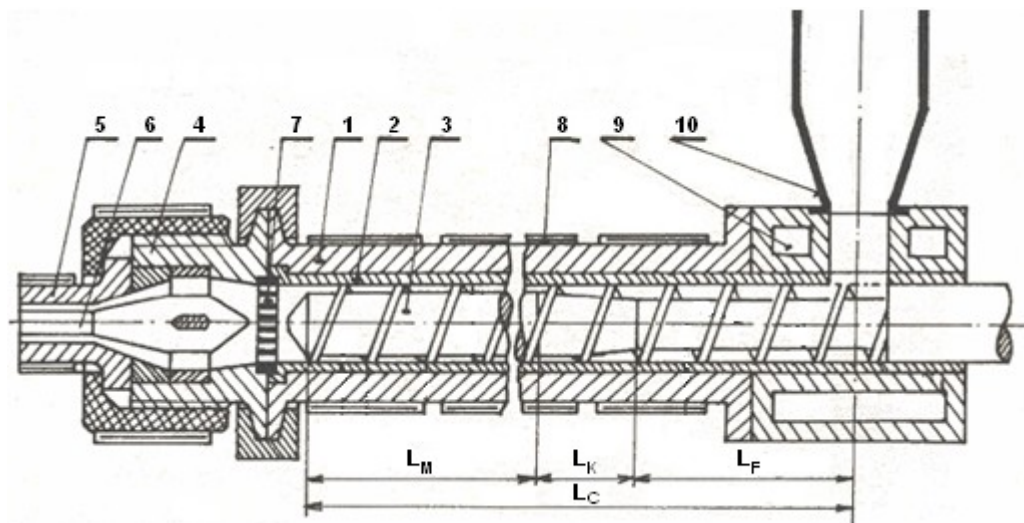
tlak a odpovídající mechanickou a teplotní homogenitu. V případě šnekového vytlačovacího stroje je tlak vyvolán otáčkami šneku.

Vytlačovací stroj se skládá z tuhého rámu (frému), ve kterém je uložený elektromotor s plynule říditelným rozsahem otáček a převodovka redukující otáčky na šnek do pomalu. Otáčky se regulují pomocí variátorů. V rámu je však hlavně uložen pracovní válec, ve kterém se s vůlí otáčí šnek. Šnek je upnutý za stopku a je uložen ve dvou radiálních a jednom axiálním ložisku, které zachycuje značnou axiální sílu.

Základní a nejdůležitější součástí stroje je šnek, který se otáčí v pracovním válci. Charakteristickým rozměrem plastikační jednotky je průměr šneku D a poměr L/D , což je poměr délky šneku vůči jeho průměru.

Šnek je v podstatě tvořen jádrem s konstantním nebo proměnným průřezem, na kterém je navinut jeden či více šroubových závitů. Tyto závitů vytvářejí kanál, v němž se pohybuje zpracovávaný materiál. Materiál vstupuje do pracovního válce v místě pod násypkou a otáčivým pohybem šneku se pohybuje vpřed. Válec je po celé délce temperován a celý temperační systém je rozdělen do několika nezávislých topných pásem z důvodu samostatné regulace. Pod násypkou bývá válec chlazen vodou, aby nedocházelo k ucpávání válce nataveným materiálem ve vstupní části. Směrem k výstupní části se teplota topných pásem zvyšuje.

Schéma vytlačovacího stroje s vytlačovací hlavou na obr.1, ukazuje typické uspořádání vytlačovacího stroje.



Obr. 1 Schéma jednošnekového vytlačovacího stroje [1]

- | | |
|----------------------------|--------------|
| 1 – pracovní válec | 6 – trn |
| 2 – pouzdro, tavící komora | 7 – lamač |
| 3 – šnek | 8 – topení |
| 4 – vytlačovací hlava | 9 – chlazení |
| 5 – hubice | 10 – násypka |



Po průchodu materiálu přes celou délku šneku je zplastifikovaný, promíchaný, stlačený materiál roztírán čelem šneku a tlakem je vytlačován přes tzv. lamač, skrz profilovací otvor, do volného prostoru. Lamač se nachází mezi koncem vytlačovacího válce a hlavou. Lamač slouží k další homogenizaci, bývá ze dvou dílů, protože se mezi těmito díly nachází ještě sítko sloužící k zachycování nečistot.

Při vytlačování tyčí je hlava jednoduchá bez trnu. Má-li být konečný profil dutý, nachází se ve vytlačovací hlavě trn, kolem kterého plast obtéká. Trny mají tvar požadované dutiny. Při výrobě trubek a profilů následuje za hlavou, kalibrovací a odtahovací zařízení. Odtah bývá většinou přes chladicí lázeň, po ochlazení se materiál dělí nebo se kontinuálně navíjí na buben.

Při výrobě desek se používá plochá vytlačovací hlava a u desek je vytlačený materiál následně válcován.

Dalším možným následným zpracováváním může být výroba fólií vyfukováním. Při tomto zpracování je použita příčná hlava, kterou se vytlačuje trubka a do té je následně přiváděn přetlak, pomocí něhož se trubka roztahuje, zvětšuje svůj průměr a zmenšuje se tloušťka stěny. Takto vzniklá fólie je následně odtahována chladicími válci.

2.3 Popis šneku a jeho geometrie [1,2,3,5]

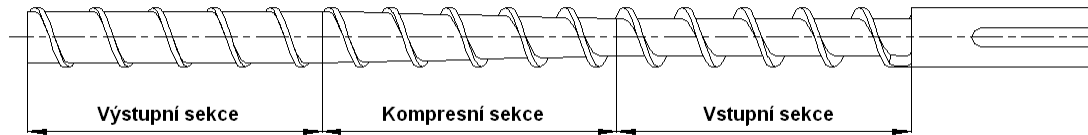
Nejdůležitější částí vytlačovacího stroje je šnek. Slouží k dopravě, stlačení, následnému zplastikování a homogenizování vytlačovaného materiálu. Šnek musí také vyvodit dostatečný tlak v tavenině, který je potřebný k průchodu přes profilovací otvor.

Základní rozdělení šneků lze provést do dvou skupin a to na šneky obyčejné (mající stejné stoupání závitu i stejnou hloubku drážky po celé délce šneku) a na diferenciální (s rozdílnou hloubku drážky při konstantním stoupání nebo s konstantní hloubkou drážky a změnou stoupání závitu).

Charakteristika diferenciálního šneku je dána kompresním poměrem, který udává poměr objemu jednoho stoupání závitu šneku na vstupu k objemu závitu na výstupu. Často je kompresní poměr udáván také jako poměr hloubky drážky ve vstupní sekci vůči hloubce drážky na výstupu.

Konvenční šnek používaný k vytlačování termoplastů je převážně tvořen třemi vyhraněnými sekcemi. Tyto sekce se od sebe odlišují různou hloubkou drážky, jak ukazuje obr. 2. První část, do které vstupuje materiál v podobě granulí, se nazývá vstupní neboli dopravní sekce. V této sekci je hloubka drážky největší. Následuje kompresní neboli přechodová sekce, kde

se mění hloubka drážky nebo stoupání šroubovice. Plast je zde stlačován, intenzivně zahříván a pevná látka přechází v taveninu. Poslední zónou konvenčního šneku je výstupní neboli homogenizační sekce, ve které je hloubka drážky nejmenší. Zde se dokončuje plastikace a tavenina plastu se homogenizuje.



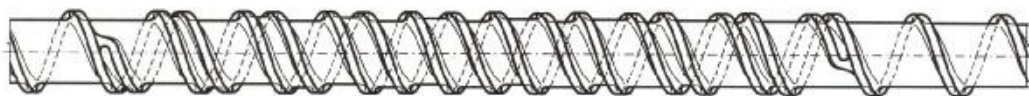
Obr. 2 Třísekční vytlačovací šnek

Jelikož má každý polymer své specifické vlastnosti (reologické, tepelné, apod.), není možné navrhnout šnek, kterým by bylo možné vytlačovat všechny typy polymerů. Proto byla vyvinuta velká řada různých typů šneků.

Jeden z nejpoužívanějších šneků dnes, je bariérový šnek. Tento šnek je tvořen dvouchodým závitem v kompresní sekci, což vytváří dvě oddělené drážky, jenž jedna slouží pro zachycení pevné látky a druhá je pro taveninu. Základním typem bariérových šneků je tzv. Mailleferův šnek, u kterého se směrem ke konci šířka sekundárního kanálu zvětšuje. Tavenina je tedy oddělena od pevné látky bariérovým křídlem, což vytváří uzavřený kanál. Bariérové křídlo je nižší než křídlo hlavní. Přes toto křídlo se protlačuje roztavený materiál, avšak touto vůlí mezi válcem a bariérovým křídlem neprojde neroztavený materiál, tím se do taveniny nedostávají tuhé části a zvyšuje se kvalita taveniny. Dalším používaným typem bariérového šneku je Baarův šnek. Ten má na rozdíl od Mailleferova šneku konstantní šířku sekundárního kanálu avšak zvětšuje se jeho hloubka.

Hlavní výhody bariérového šneku:

- vyšší výkon plastifikace;
- nižší namáhání materiálu i při vyšších otáčkách šneku;
- nižší degradace materiálu;
- lepší homogenita materiálu;
- lepší probarvení;
- vyšší kapacita samočištění - oddělování materiálu od povrchu šneku.



Obr. 3: Mailleferův bariérový šnek s neúplným dvojhodým závitem [2]

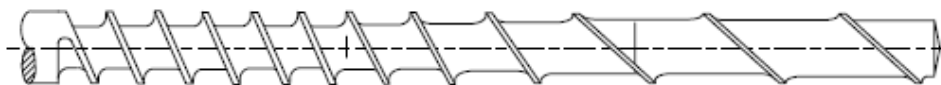
Pro navlhavé materiály a materiály obsahující těkavé látky se používají šneky s odplyňovací zónou. Tyto šneky bývají delší než klasické, s délkou kolem 30D a jsou tvořeny v podstatě dvěma šneky s různými kompresními poměry. Na začátku šneku je materiál zplastikován a stlačen, poté následuje odplyňovací zóna, kde se náhle zmenší průměr jádra a tím klesne tlak v tavenině a nastane uvolnění plynů, které jsou odvedeny odplyňovacím otvorem. V dalším průběhu je tavenina opět stlačena a je dokončena její homogenizace.

V praxi se vyskytuje velké množství různých modifikací standardního šneku. Není možné se o všech zmínit. Obrázek 4 ukazuje standardní šnek s dalším závitem v dopravní sekci. Další závit má za cíl eliminovat kolísání tlaku způsobené přerušováním přívodu materiálu při každé otáčce. Nevýhoda je, že druhé rameno snižuje plochu průřezu kanálu a zvyšuje kontaktní plochu mezi lůžkem pevné látky a šnekem. Tudiž, jsou redukovány tlakové vlny, ale aktuální výkon dopravy pevné látky bude snížený. Následkem toho, dvouchodé dopravní sekce šneků v hladkém válci vytlačovacího stroje mají často za následek snížený výkon.



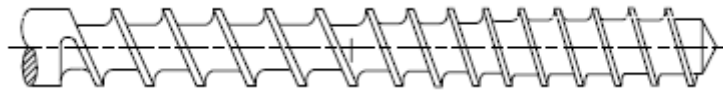
Obr. 4 Dvouchodá dopravní sekce [3]

Obr. 5 ukazuje proměnné stoupání šneku. Proměnné stoupání dovoluje použití místního optimálního úhlu stoupání šroubovice, tzn. optimální úhel stoupání šroubovice pro dopravu pevné látky v dopravní sekci a optimálním úhel stoupání pro dopravu taveniny ve výstupní sekci šneku.



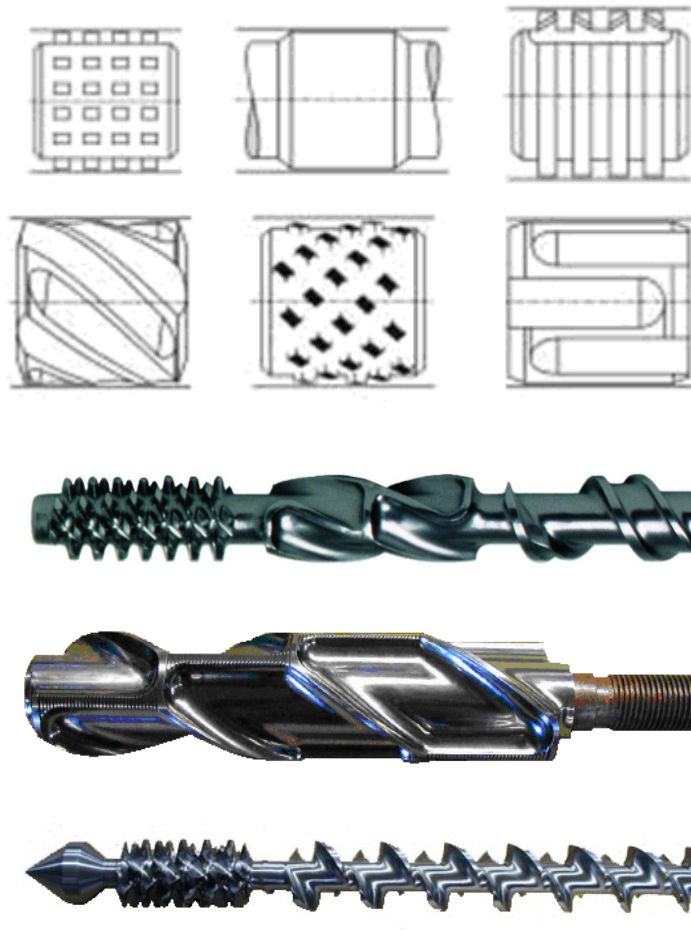
Obr. 5 Šnek s proměnným stoupáním [3]

Obr. 6 ukazuje proměnnou rozteč šneku, jaká je často užívaná pro vytlačování kaučuku. V případě této geometrie šneku, se snižuje rozteč s axiální vzdáleností, což je opak k šneku na obr. 5. Snižování rozteče způsobuje druhou kompresi materiálu v kanálu šneku; následkem toho, může být obyčejná komprese od snižující se hloubky kanálu nižší nebo dokonce vyloučena.



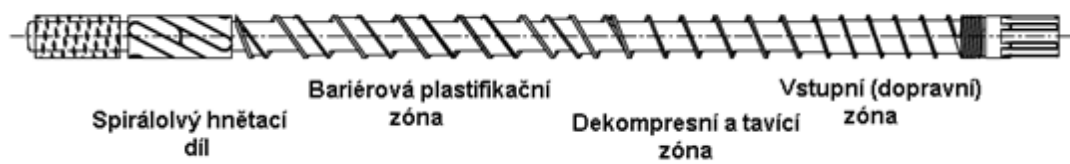
Obr. 6 Šnek pro vytlačování kaučuku [3]

K vytlačovaným plastům jsou často přidávána různá plniva v podobě barviv, skelných vláken, minerálních prášků, apod., proto je kladen velký důraz na kvalitní zhomogenizování materiálu. Pro zlepšení promíchání a zvýšení homogenity taveniny polymeru jsou ke standardním šnekům často přiřazovány různé mísící a torpédové sekce. Některé druhy těchto sekcí jsou ukázány na obr 7.



Obr. 7 Mísící a torpédové sekce [6]

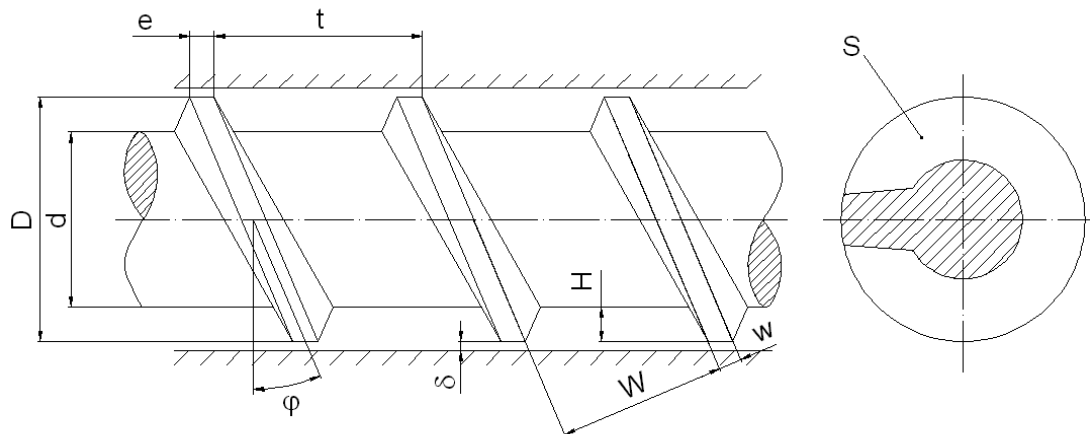
Dnes běžně používaný šnek může být kombinací různých modifikací šneků, jak ukazuje obr. 8.



Obr. 8: Bariérový šnek s dekompresní zónou a přidavnými díly [6]

2.3.1 Geometrie standardního šneku [4,5]

Šnek je obecně tvořen kombinací několika ploch. Jádru šneku tvoří plocha, která je dle typu šneku válcová, kuželová nebo tvořená kombinací obou těchto ploch. Na jádru šneku je navinuta jedna či více šroubových ploch. Je-li na jádru navinuta jedna šroubovice, jde o jednochodý šnek, je-li šroubovic více, jedná se o vícechodý šnek. Tyto šroubovice vytvářejí šnekový kanál, sloužící k zachycení a dopravě materiálu. Smysl stoupání šroubovice je používán jak pravý tak i levý a úhel stoupání šroubovice je opět dle typu konstantní nebo se může měnit. Profil ramena šroubovice se používá jak obdélníkového, tak i lichoběžníkového tvaru. Obrázek 9 ukazuje základní rozměry konvenčního šneku a řez kolmý na osu šneku.



Obr. 9 Základní geometrie šneku [4]

D – průměr šneku přes závit [m]

d – průměr jádra šneku [m]

H – hloubka kanálu [m]

t – rozteč [m]

δ – radiální vůle [m]

φ – stoupání šroubovice [°]

e – šířka závitu [m]

W – šířka šroubového kanálu ve směru kolmém na závit [m]



w – šířka závitu ve směru kolmém na závit [m]

p – počet chodů šneku [-]

S – plocha průřezu kanálu v osovém směru šneku [m²]

Rozměry šneku mohou být vyjádřeny jednoduchými geometrickými závislostmi.

Úhel stoupání šroubovice je vyjádřen jako:

$$\tan\varphi = \frac{t}{\pi D} \quad (1)$$

Průměr jádra šneku:

$$d = D - 2H \quad (2)$$

Šířka kanálu:

$$W = t \cos\varphi - w \quad (3)$$

Délka nenavinutého šnekového závitu Z :

$$Z = \frac{L}{\sin\varphi} \quad (4)$$

Velikost plochy průřezu kanálu A ve směru kolmém na osu šneku lze vypočítat ze vztahu:

$$S = \left[\frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) - \frac{peh}{\sin\varphi} \right] \quad (5)$$

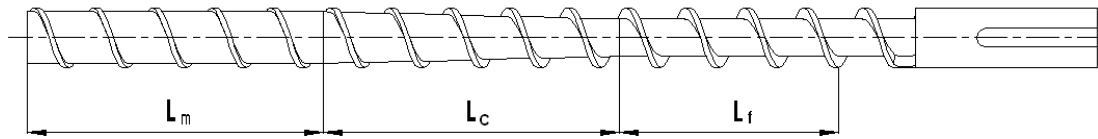
kde:

D – průměr šneku přes závit [m], d – průměr jádra šneku [m], H – hloubka kanálu [m], t – rozteč [m], δ – radiální vůle [m], φ – stoupání šroubovice [°], e – šířka závitu [m], W – šířka šroubového kanálu ve směru kolmém na závit [m], W – šířka závitu ve směru kolmém na závit [m], p – počet chodů šneku [-], L – délka šneku [m], Z – délka nenavinutého kanálu [m]

Jak již bylo uvedeno v kapitole 2.3, konvenční šnek je tvořen třemi sekcemi a to dopravní, kompresní a výstupní. V případě tohoto šneku je stoupání šroubovice konstantní a komprese je dána změnou hloubky šnekového kanálu. Jádro kompresní sekce je tudíž kuželové, s kuželovitostí závislou na délce této sekce a na hloubce kanálu ve vstupní a výstupní sekci. Na obr. 10 jsou znázorněny délky těchto sekcí, zde je důležité poznamenat, že začátek vstupní sekce je vztahen k vstupnímu otvoru ve válci. Někdy je



začátek sekce brán od středu otvoru, v jiném případě od okraje ve směru dopravy.



Obr. 10 Délky jednotlivých sekcí

L_f – délka dopravní sekce [m]

L_c – délka kompresní sekce [m]

L_m – délka výstupní sekce [m]

Charakteristikou šneku je jeho kompresní poměr, který udává poměr objemu šnekového závitu pro jedno stoupání pod násypkou k objemu závitu na konci šneku. Tento poměr je označován jako objemový kompresní poměr a lze ho spočítat takto [7]:

$$X_v = \frac{[H_f(L_f - p_f e_f)] \cdot (D - H_f)}{[H_m(L_m - p_m e_m)] \cdot (D - H_m)} \quad (6)$$

X_v – objemový kompresní poměr [-], H_f – hloubka kanálu dopravní sekce [m], H_m – hloubka kanálu výstupní sekce [m], p_f – počet chodů šneku v dopravní sekci [-], p_m – počet chodů šneku ve výstupní sekci [-], e_f – šířka závitu v dopravní sekci [m], e_m – šířka závitu ve výstupní sekci [m]

Kompresní poměr se pohybuje v rozmezí 1,5:1 až 5:1.

Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, kompresní poměr se také udává jako poměr hloubky šnekového kanálu ve vstupní zóně, ku hloubce kanálu ve výstupní zóně a je označován jako hloubkový kompresní poměr [1]:

$$X_c = \frac{H_f}{H_m} \quad (7)$$

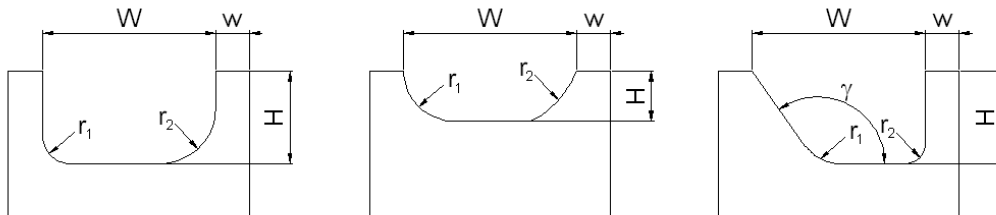
X_c – hloubkový kompresní poměr [-],

H_f – hloubka kanálu dopravní sekce [m],

H_m – hloubka kanálu výstupní sekce [m]

Šnekový kanál může mít různé zaoblení hran či zkosení boku ramena závitu, jak ukazuje obrázek 11. Uvážíme-li, že poměr hloubky kanálu H k

šířce kanálu W je obvykle asi $1/10$, použití poloměrů zaoblení shodných s hloubkou kanálu, může snížit kontaktní plochu mezi lůžkem pevnou látkou a šnekem asi o 6 až 7%, zatímco kontaktní plocha mezi lůžkem pevné látky a válcem zůstává nezměněná, což příznivě ovlivní třecí poměr. Nevýhodou velkých rádiusů je snížení průřezové plochy kanálu. V případě lichoběžníkového tvaru ramene šroubovice platí totéž jako u zvětšujících se rádiusů.



Obr. 11 Geometrie kanálů

H – hloubka kanálu [m]

W – šířka šroubového kanálu ve směru kolmém na závit [m]

w – šířka ramene závitu ve směru kolmém na závit [m]

$r_{1,2}$ – poloměry zaoblení [m],

[4]

Rozměr charakterizující plastikační jednotku a především šnek, je průměr šneku přes závit D a poměr L/D , tedy poměr délky šneku vůči průměru šneku. Délka šneku se udává v násobcích průměrů šneků, tedy např. $20D$. Délky šneků se obvykle pohybují v rozmezí $20 - 30D$. Úhel stoupání šroubovice je také významným rozměrem šneku a pohybuje se v rozmezí od $0,7$ do $1,5D$ a jako optimální stoupání se používá $1D$, což odpovídá úhlu $17,66^\circ$.

Pro definování geometrie konvenčního šneku budou uvedeny hlavní vlastnosti standardního šneku:

- Celková délka $20 - 30 D$
- Délka dopravní sekce $4 - 8 D$
- Délka výstupní sekce $6 - 10 D$
- Počet paralelních závitů 1
- Rozteč $1D$ (úhel stoupání šroubovice 17.66°)
- šířka ramena $0.1 D$
- hloubka kanálu v dopravní sekci $0.15-0.20 D$
- poměr hloubek kanálů $2-4$



Tyto rozměry jsou přibližné, ale je zajímavé, že většina vytlačovacích šneků užívaných dnes, má hlavní vlastnosti shodující se s uvedenými. Pro profilové vytlačování *PA*, odborníci doporučují hloubku kanálu:

$$\text{v dopravní části } H_f = 0.11 (D + 25) \quad (8)$$

$$\text{ve výstupní části } H_m = 0.04 (D + 25) \quad (9)$$

kde jsou hloubky kanálu H a průměr šneku D vyjádřeny v mm .

[3]

Dopravní sekce [3]

Dopravní nebo také vstupní sekce je první úsek šneku, kde polymer vstupuje do závitu. Na hladkém válci vytlačovacího stroje, je to nejhlubší část šneku. Na menších šnecích, s průměry 0,06m a menšími, je kladena zvláštní pozornost na průřez šneku z důvodu snížení nebezpečí ukroucení šneku, v důsledku kroutícího momentu.

Hlavní funkce dopravní části šneku je doprava pevné látky. Základní teorie dopravy pevné látky je, že se plast musí nalepit na vnitřní průměr válce a šnek tlačí polymer, který má být sunutý vpřed. K tomuto působení dojde pouze tehdy, je-li součinitel tření polymeru větší na stěně válce než na povrchu šneku. Tudíž, některé polymery mají nepochybně lepší součinitel tření než jiné. V případě kaučuků nejsou dlouhé dopravní části potřebné. Typicky, pro většinu kaučuků je délka dopravní části 4 až 5 násobek průměrů, kromě otvoru pro násypku, tato délka zajistí dostatečný tlak, který je potřebný aby se materiál sunul vpřed.

V případě kaučuků špatných pro dopravu nebo materiálů s nízký součinitelem tření, mohou být použité délky dopravní části 8 až 10 násobek průměru. Jeden z důvodů delších dopravních sekcí je to, že se počítá s větším množstvím tepla, které má být předáno pevné látce v plastickém stavu, což způsobí přilepení k válci, které pomůže vyvolat tlaky potřebné pro dobrou dopravu pevné látky. Mělo by být také uvedeno, že v případě materiálu se špatnou dopravou, je výhodné použití vnitřního chlazení šneku za účelem udržení jádra šneku chladným a dosažení tím lepšího součinitele tření mezi plastem a ocelí na jádru šneku.

Přechodová sekce

Nejdůležitější faktor, který musí být vzatý na vědomí při návrhu přechodové části je to, že sklon přechodu by měl odpovídat nejvyššímu tavicímu výkonu který je pro materiál možný. Za účelem maximalizovat výkonnostní poměr vytlačovacího stroje a snížit stupeň opotřebení šneku a válce, je tento výpočet velmi důležitý. Nejdůležitějším faktem je však vyvarování se ucpání kompresní sekce lůžkem pevné látky, neboť při vyskytnutí se tohoto problému přestane extrudér pracovat.



Výstupní sekce

Ve výstupní nebo také homegenizační sekci šneku je dokončené tavení polymeru a uskutečňuje se protlačování přes vytlačovací hlavu. V této sekci je hloubka drážky nejmenší, tudíž i průřez kanálu ve směru kolmém na osu je nejmenší. Zde je důležitým faktorem radiální vůle mezi vnitřním průměrem válce a ramenem závitů. Přes tuto vůli se protlačuje tavenina a tím se homogenizuje. Bude-li tato vůle příliš vysoká, bude odpor této vůle malý, tavenina se nebude intenzivně protlačovat a homogenita bude klesat.

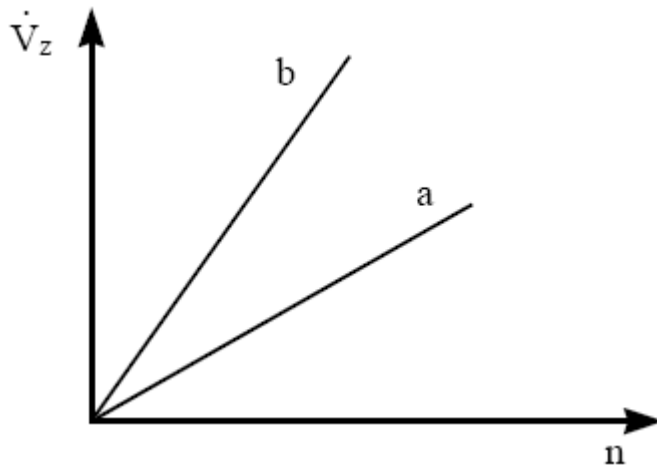
2.4 Vliv drážkovaného válce ve vstupní zóně vytlačovacího stroje

Cílem vytlačovacího stroje je poskytnout co nejvyšší možné vytlačované množství. Za účelem zlepšení způsobu dopravy pevné látky materiálu, který má špatný součinitel tření, byla vyvinuta v Evropě během šedesátých let technologie dopravní drážky.

Pracovní válec je opatřen axiálním drážkováním v dopravní sekci. Jedná se o nucenou dopravu materiálu. Drážkování jednak slouží ke zvětšení průřezu této sekce a jednak se drážkováním vyřeší problém poměru součinitele tření mezi válcem a plastem, protože granule vstupující do extrudéru jsou zachycovány drážkami, což při stlačení v "zátku" zabraňuje jejímu prokluzu na povrchu válce a je tedy zajištěna stabilní doprava materiálu. Drážkovaná vstupní sekce také zvyšuje tlak potřebný pro dopravu materiálu, tudíž je podpořen průchod kompresní sekci.

Používají se různé tvary drážkování, mezi nejběžněji používané patří obdélníkové, trojúhelníkové a půlkruhové tvary drážek.

Jelikož drážky zvětší průřez dopravní sekce, zvýší se přirozeně vytlačované množství \dot{V}_z při stejných otáčkách n , jak ukazuje grafická závislost srovnání hladkého a drážkovaného válce v dopravní sekci stroje (obr. 12).



Obr. 12 Závislost vytlačovaného množství na otáčkách

a – klasická konstrukce

b – stroj s drážkovaným pouzdem

[8]

2.5 Materiály používané na výrobu šneků a povrchové úpravy [9]

Šneky jsou velice namáhané strojní součásti a to jak pevnostně tak i co se týče jejich opotřebení. Budeme-li se zabývat pevnostním namáháním, bude se jednat o kombinaci ohybu (od vlastní tíhy šneku), krutu (od kroutícího momentu), vzpěru (působení tlaku taveniny na čelo šneku). Nejvíce namáhaný bude šnek hned u stopky, kde bývá průřez jádra nejmenší. Z důvodů dostatečné pevnostní bezpečnosti, nelze v některých případech navrhnout optimální geometrii šneku, to se týká hlavně menších šneků.

Opotřebení povrchu je závislé na mnoha faktorech. Nejedná se pouze o opotřebení mechanické, ale také o chemické narušování povrchu. Mnohé plasty totiž obsahují chemicky agresivní látky reagující s kovem. Plniva přidávaná k plastům, jako jsou především skelná vlákna, ale i talek, křída, barviva apod. působí značným otěrem na povrch.

Nitridace

Pro výrobu běžných šneků, zpracovávajících neagresivní plasty bez plniv, se používají ušlechtilé materiály, které se opatřují nitridovanou vrstvou. Jedná se o povrchovou úpravu, kde se povrch opatří tenkou vrstvou dusíku. Povrch šneku je vystaven za zvýšené teploty účinku atomárního dusíku, který vzniká při rozkladu čpavku. Tloušťka vzniklé vrstvy bývá okolo 0,5 mm a tvrdost se pohybuje v rozmezí 900 – 1050 HV. Tento způsob má velkou nevýhodu, kdy tvrdost této vrstvy s hloubkou klesá, tudíž s ubývajícím tloušťkou roste rychlost opotřebení.

Pancéřování

S použitím další možné povrchové úpravy tento problém odpadá. Jedná se tzv. pancéřování, kdy je na povrch nanášena navařovaná vrstva tvrdokovu. Tloušťka této vrstvy se pohybuje od 2 do 3 mm. Tato vrstva má na rozdíl od nitridované vrstvy po celé tloušťce stejnou tvrdost.



Obr. 13 Možnosti povrchových úprav šneku [10]

Šneky s povlakem karbidu wolframu

Tenká vůči opotřebení odolná vrstva speciálního karbidu wolframu je aplikovaná na základní ocel užitím procesu nazvaného "Thermal spray". Užití tohoto postupu umožňuje pokrytí celého povrchu šneku (pouze hřbet spirály není pokryt) s výbornou přilnavostí a dosažení vysoké úrovně tvrdosti 70 - 72 HRC. Životnost těchto šneků může být více než 3 až 5 krát vyšší než u šneků navařených tradičním způsobem pracujících za stejných podmínek. Mimoto tento jednou poškozený povlak může být znovu aplikován.

Nerezový šnek

V případě velkých problémů týkajících se korozního opotřebení, šneků realizovaných ze speciální slitiny, která zlepšuje jeho vlastnosti při nárůstu teploty. Vysoký obsah molybdenu dodává odolnost k místní korozi jako např. důlková koroze, speciálně při zpracování fluoropolymerů.

2.6 Popis pochodů v plastifikační jednotce

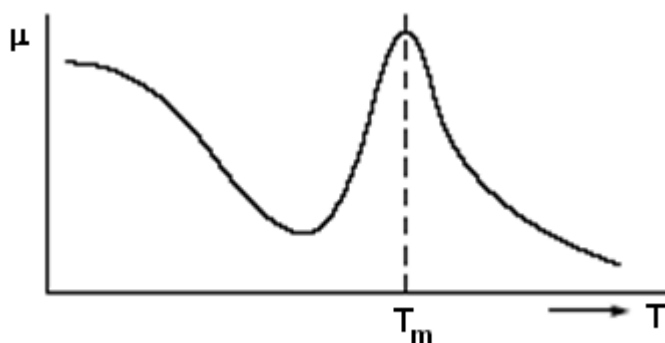
Z matematického hlediska je popis pochodů v plastifikační jednotce dost složitá a obsáhlá problematika, jelikož během průchodu materiálu se mění skupenství látky a zatímco ve vstupní sekci by se pohyb materiálu popisoval jedněmi zákonitostmi, ve výstupní sekci už platí naprosto odlišné. V kompresní sekci je popis změn zjevně nejkomplikovanější, neboť v této sekci dochází k tavení a je zde jak tavenina, tak tuhá fáze. Řešení pochodů vede často k složitým diferenciálním rovnicím. Teoretický popis průchodu materiálu extrudérem je vysvětlen níže.

Zatímco u tuhé fáze se veškeré změny odehrávají na styčných plochách materiálu, šneku a válce, u taveniny se veškeré změny přenášejí do celého objemu.

2.6.1 Popis průchodu materiálu vstupní sekci [2,4]

Do vstupní zóny se materiál dostává z násypky, pod níž je materiál zachycován otáčejícím se šnekem. Otáčivým pohybem za pomoci tření plastu o čelo závitu a gravitace se materiál posouvá dopředu a postupně se stlačuje. Třením o povrch šneku a vlastního tření granulátu o sebe je materiál zahříván, až dojde k vzniku tzv. zátky. Pohyb zátky je podmíněn třecími poměry mezi plastem a povrchem šneku a plastem a povrchem stěny válce. Tření mezi povrchem válce a polymerem musí být větší než tření o povrch šneku. Je-li tato podmínka splněna, zátka se neprotáčí ve válci a je tlačena otáčejícím se šnekem, po jehož povrchu se zátka smýká. V opačném případě se zátka přilepí na šnek a smýká se po povrchu válce, tudíž nedochází k dopravě materiálu.

Důležitým faktorem ovlivňujícím koeficient tření je teplota polymeru. Při posunu zátky vzniká na jejím povrchu vrstva taveniny, tzv. povrchová vrstva. Křivky závislosti koeficientu tření na teplotě mají maximum v oblasti teploty tání (obr.14). Při dalším zvyšování teploty nad teplotu tání, koeficient tření klesá. Tudíž při předčasném vytvoření povrchové vrstvy začne zátka prokluzovat a dojde zastavení posunu. Je proto důležité udržovat teplotu válce v optimálním rozmezí. V zátce se s narůstající dráhou zvyšuje tlak, zvyšuje se hustota zátky a roste tloušťka povrchové vrstvy. Překročí-li tloušťka povrchové vrstvy vůli mezi hřbetem závitu a vnitřním průměrem válce, začne být vrstva taveniny stírána čelem závitu. Další tavení se děje v kompresní zóně.



Obr. 14 Koeficient tření v závislosti na teplotě [8]

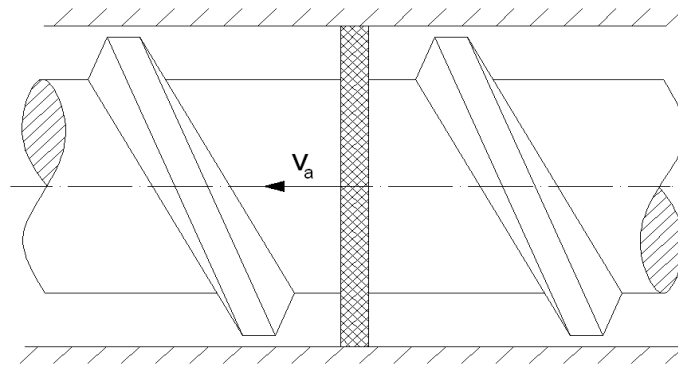
μ – součinitel tření [-]

T – teplota [$^{\circ}\text{C}$]

T_m – teplota tání semikrystalického plastu [$^{\circ}\text{C}$]



Stlačený materiál se ve vstupní zóně pohybuje absolutní rychlostí v_a ve směru osy šneku, tato rychlost je naznačena na obr. 15.

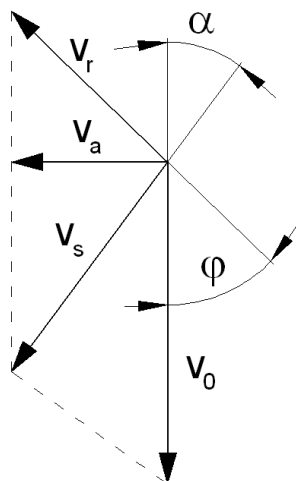


Obr. 15 Vektor rychlosti pevné látky v axiálním směru [4]

Pohyb stlačeného materiálu ve vstupní sekci však může být popsán podle rychlostního obrazce (obr. 16). Šnek se otáčí obvodovou rychlostí v_0 . Rychlost v_s je absolutní rychlost a touto rychlostí se pohybuje materiál vůči pevné soustavě. Materiál se vůči šneku pohybuje relativní rychlostí v_r , která má směr shodný se směrem ubíhajícího kanálu.

[4]

Úhel φ je úhel stoupání šroubovice. Třecí poměr mezi materiálem a vnitřní plochou válce a materiálem a povrchem šneku je vyjádřen úhlem třecích poměrů α .



Obr. 16 Rychlostní obrazec [4]

- v_0 – obvodová rychlost šneku [$m \cdot s^{-1}$]
- v_s – absolutní rychlost materiálu vůči pevné soustavě [$m \cdot s^{-1}$]
- v_r – relativní rychlost materiálu vůči šneku [$m \cdot s^{-1}$]
- v_a – rychlost dopravy materiálu ve směru osy šneku [$m \cdot s^{-1}$]
- α – úhel třecích poměrů [$^\circ$]
- φ – úhel stoupání šroubovice [$^\circ$]



Obvodová rychlost v_0 šneku je dána vztahem:

$$v_0 = \pi DN \quad (10)$$

kde:

D – průměr šneku [m], N – otáčky šneku [s^{-1}]

Za pomoci sinusových vět jsou z rychlostního obrazce odvozeny další vztahy:

$$v_s = v_0 \frac{\sin \varphi}{\sin(\alpha + \varphi)} \quad (11)$$

v_0 – obvodová rychlost šneku [$m \cdot s^{-1}$], α – úhel třecích poměrů [$^\circ$],
 φ – úhel stoupání šroubovice [$^\circ$]

$$v_r = v_0 \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha + \varphi)} \quad (12)$$

v_r – relativní rychlost materiálu vůči šneku [$m \cdot s^{-1}$], v_0 – obvodová rychlost šneku [$m \cdot s^{-1}$], α – úhel třecích poměrů [$^\circ$], φ – úhel stoupání šroubovice [$^\circ$]

$$v_a = v_0 \frac{\tan \alpha \tan \varphi}{\tan \alpha + \tan \varphi} \quad (13)$$

v_a – rychlost dopravy materiálu ve směru osy šneku [$m \cdot s^{-1}$], v_0 – obvodová rychlost šneku [$m \cdot s^{-1}$], α – úhel třecích poměrů [$^\circ$], φ – úhel stoupání šroubovice [$^\circ$]

Jak už bylo řečeno, vyjadřuje úhel α vliv třecích poměrů. Bude-li tření materiálu vůči válci malé, resp. se bude blížit 0 (tzn. že materiál klouže po stěně válce), pak bude úhel $\alpha = 0$, z čehož vyplývá rychlost $v_a = 0$, tudíž se materiál nebude posouvat ve směru osy (bude se točit se šnekem) a výkon šneku je nulový. Druhým extrémem je možnost, že se materiál se šnekem neotáčí, tj. aby se $\alpha = 90^\circ$, pak by šnek měl teoreticky maximální výkon (materiál by se pouze posouval jako matice po šroubu). Reálný výkon je někde mezi těmito hodnotami.

Pro určení dodávaného objemového množství v dopravní sekci byl odvozen tento vztah:

$$\dot{Q} = \pi^2 D(D - H)HN \left(1 - \frac{pe}{t}\right) \frac{\tan\alpha \tan\varphi}{\tan\alpha + \tan\varphi} \quad (14)$$

kde:

\dot{Q} – výkon [m^3/hod], D – průměr šneku [m], H – hloubka kanálu výstupní sekce [m], N – rychlost šneku [hod^{-1}], α – úhel třecích poměrů [$^\circ$], φ – úhel stoupání šroubovice [$^\circ$], p – počet chodů šneku [-], e – šířka závitů [m], t – rozteč [m]

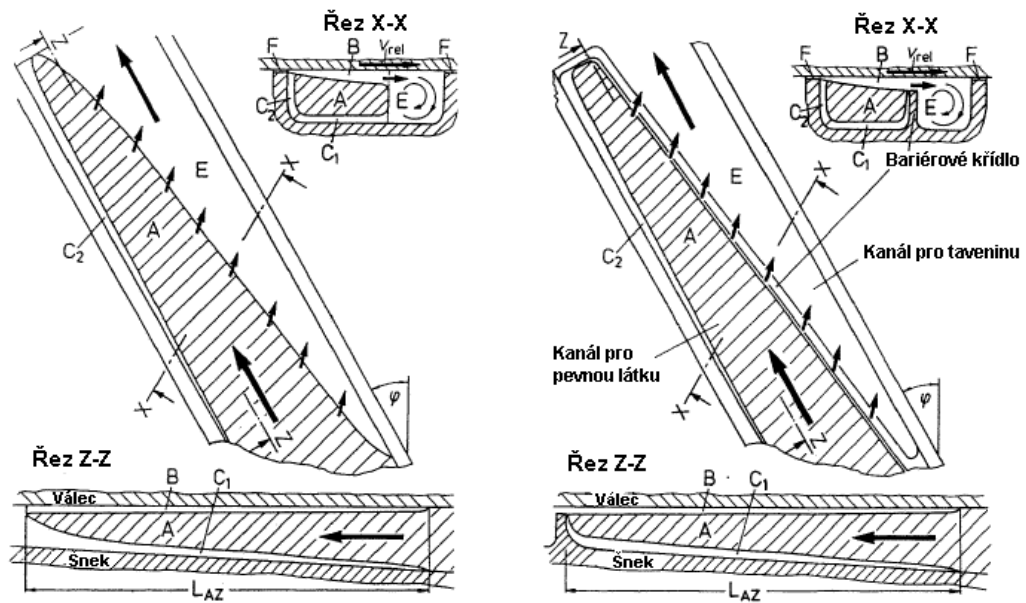
[2]

2.6.2 Popis tavení v kompresní sekci šneku [6]

V této sekci se zmenšuje objem drážky šneku a tím pádem dochází k intenzivnímu stlačování a tavení a tuhá látka přechází v taveninu. Materiál je zde taven teplem přivedeným z topných pásů, ale také frikčním teplem vznikajícím třením o povrch šneku a válce.

Tavení je jedno ze základních úkolů plastifikace vytlačovacího stroje. Proto, musejí být šneky navrhované podle tavení pevné látky materiálu. Vizualní jakostní rozbory z procesů tavení vedly k velkému rozsahu známých modelů. Maddockův model je převládající model, ve kterém se tavenina nesmýká po stěně. Proto, je všechno další uvažování založené na tomto modelu.

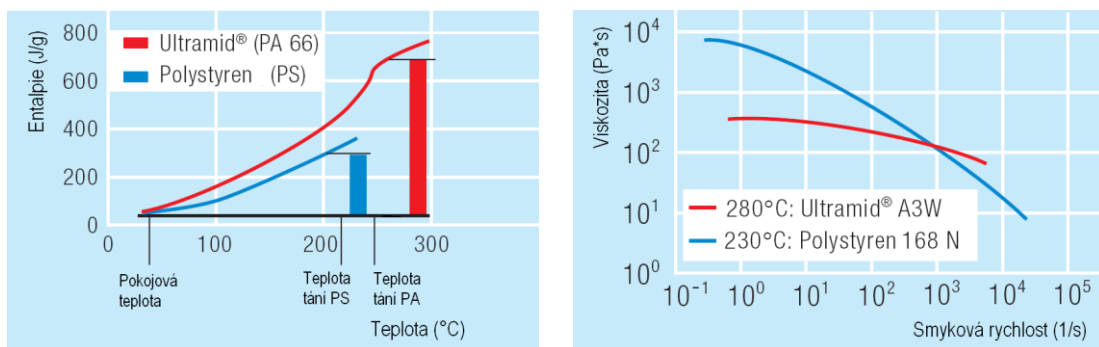
Obr. 17 ukazuje schéma celé tavící sekce a pro srovnání je na obrázku vpravo zobrazen průběh tavení v bariérovém šneku. Pevná látka A je úplně obalená taveninou a teče na filmech taveniny C1 a C2 na povrchu jádra a boku závitů. Tloušťka těchto vrstev se neustále zvětšuje ve směru dopravy kvůli ohřívání šneku. Nicméně, tavení pevné látky se děje hlavně na vnitřní stěně válce. Pevná látka je ohřívána přenosem a disipací ve filmu taveniny s tloušťkou jen několik málo desetin milimetrů, B. Relativní rychlost v_r mezi válcem a pevnou látkou vede k okamžité přepravě taveniny. Ta se hromadí ve víru taveniny E u čela závitů. Trocha pevné látky je také tavena na straně, která přiléhá k čelu víru taveniny. Kromě toho, je malá část vrácena z E skrz vůli F do filmu taveniny B (tečení prosakováním). Ve směru kanálu se stává vír taveniny širší, v případě konstantní hloubky drážky H. To stlačuje pevnou látku k čelu závitů. Směrem ke konci tavící sekce, se granulát stlačením utemuje v jediný kus. Proto, není možné přesně definovat konec tavící zóny.



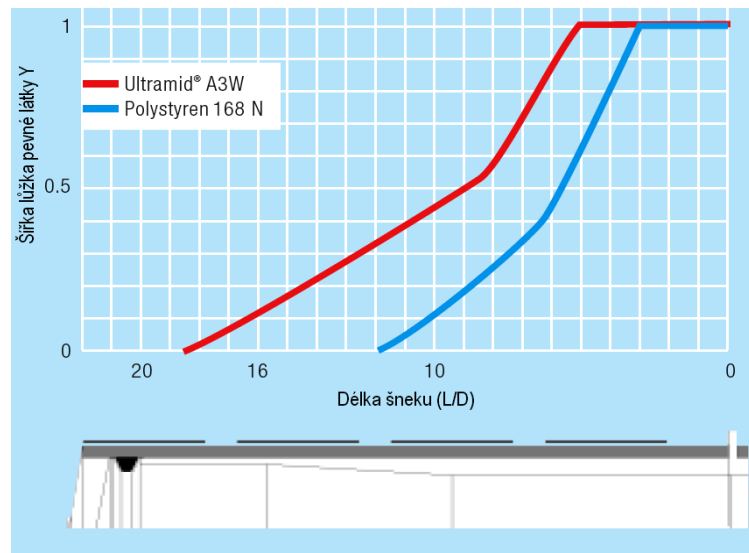
Obr. 17: Tavení v konvenčním šneku (nalevo) a v bariérové plastifikační zóně (napravo) [6]

- A – lůžko pevné látky
- B – vrstva taveniny na stěně válce
- C₁ – vrstva taveniny na jádru šneku
- C₂ – vrstva taveniny na boku přepážky
- E – tavenina v kanálu a vír taveniny
- F – vůle mezi vnitřním průměrem válce závitem šneku

Rychlost tavení a zmenšování lůžka pevné látky je závislé především na tepelných vlastnostech zpracovávaného materiálu (obr. 18). Porovnáme-li mezi sebou průběh zužování lůžka pevné látky amorfního plastu (PS) a semikrystalického plastu (PA) zpracovávaného stejným šnekem, uvidíme zřetelný rozdíl (obr. 19).



Obr. 18 Porovnání vlastností obou polymerů [11]



Obr. 19 Změna šířky lůžka pevné látky [11]

Nedostatkem konvenčních šneků je fakt, že se do víru taveniny dostávají částčky pevné látky. Tyto částčky zůstávají ve středu víru taveniny a nedostanou se ke stěně válce a ani šneku, to znamená, že již nebudou namáhány smykovými silami, způsobujícími jejich natavení a rozetření po délce profilu drážky. To způsobí teplotní a mechanickou nehomogenitu. Tímto způsobem vznikají po délce profilu závitů stočené struny nehomogenního materiálu.

Tento problém byl vyřešen zavedením bariérových šneků. Pevná látka je zde zachycena bariérovým křídlem, jenž vytváří uzavřený kanál. Šířka tohoto kanálu se ve směru drážky šneku zmenšuje a naopak se zvětšuje šířka kanálu pro taveninu. Odtavená povrchová vrstva kanálu pro pevnou látku přechází přes bariérové křídlo, kdežto pevná látka přes toto křídlo neprojde. Tím se do taveniny nemůžou dostávat tuhé částice a materiál je tak lépe zhomogenizován. Srovnání homogenity při zpracování konvenčním šnekem a bariérovým šnekem je ukázáno na obr. 20.



Obr. 20 Homogenita taveniny [11]



2.6.3 Popis chování taveniny ve výstupní sekci [5,8]

Ve výstupní sekci je obsažena převážně tavenina. Ta je dopravována dále působením viskózního tření, které vzniká vzájemným pohybem šneku vůči válci.

Základním a nejdůležitějším parametrem vytlačovacího stroje je jeho výkonnost. Ta je posuzována podle výsledného toku, což je vytlačené množství za jednotku času při daných provozních podmínkách (otáčky, teplota pásu stroje). Druhým hlediskem je jakost výsledného produktu. Výsledný tok lze popsat následnou rovnicí.

$$\dot{Q} = A \cdot n - B \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial l} \quad (15)$$

Kde první člen vzniká důsledkem tření mezi hmotou a válcem a rotujícím šnekem a nazývá se tzv. smykový tok. Ten si lze představit jako výkon stroje bez odporu vytlačovací hlavy, kde materiál vytéká bez tlaku. A je konstanta zahrnující geometrii šneku a n jsou otáčky šneku.

Druhý člen se nazývá tlakový tok, který je vyvolán odporem hlavy. B je konstanta zahrnující geometrii hlavy, η je viskozita taveniny a výraz $\frac{\partial p}{\partial l}$ je tlakový gradient přes výstupní pásmo šneku.

Konečné dodávané objemové množství taveniny dodávané výstupní sekci, při zanedbání talkového toku, může být napsané jako:

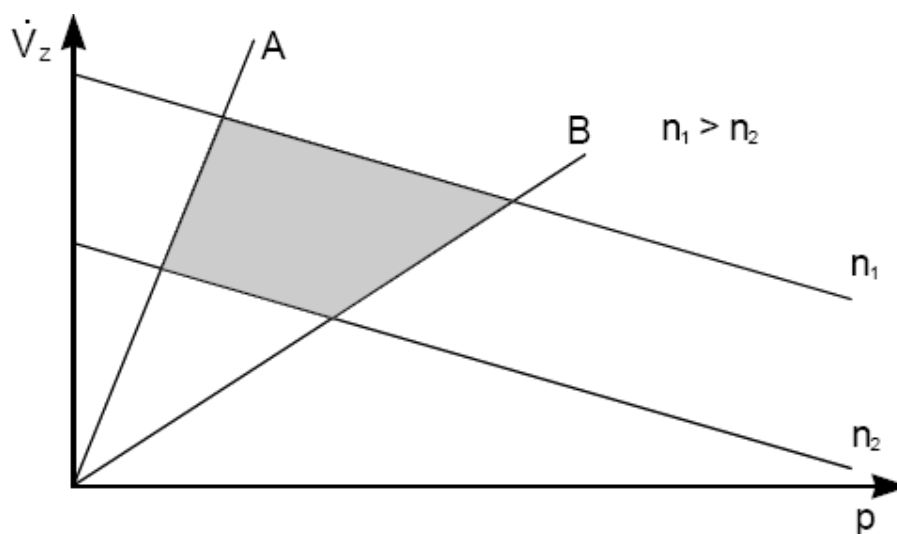
$$\dot{Q} = 0,5\pi^2 D^2 H N \tan \varphi \quad (16)$$

\dot{Q} – dodávané množství [m^3/hod], D – průměr šneku [m], H – hloubka drážky výstupní sekce [m], N – otáčky šneku [s^{-1}], φ – úhel stoupání šroubovice [$^\circ$]

Za pomoci této rovnice lze s dobrou přesností odhadnout výkonnost stroje. Z rovnice je zřejmé že zvýšení výkonnosti stroje lze jednoznačně zvýšit otáčkami stroje.

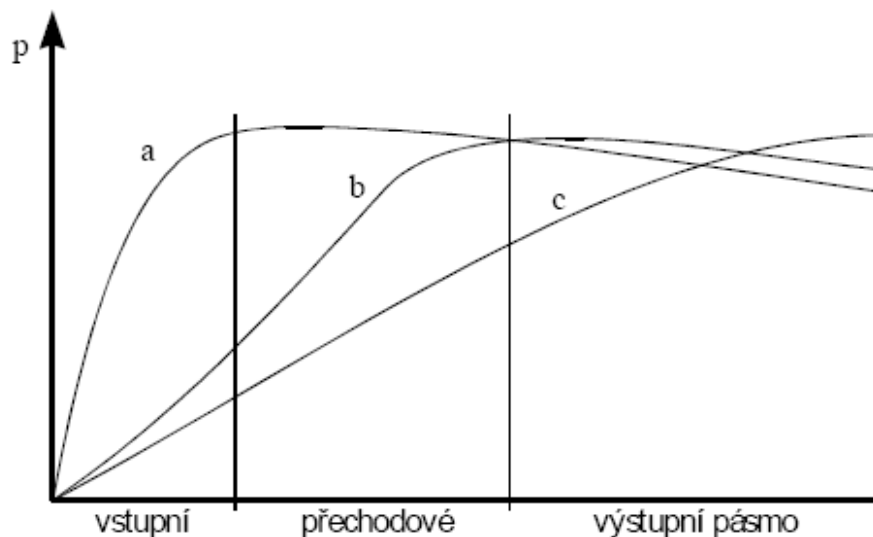
Uvažujeme-li taveninu plastu jako newtonovskou tekutinu ($m=1$), zobrazením závislosti vytlačovaného množství na tlaku (Obr. 21) dostaneme přímky, které tvoří tzv. charakteristiku šneku (n_1 a n_2). Obdobně platí pro charakteristiku vytlačovací hlavy (A a B). Charakteristiky šneku a hlavy při dané teplotě vymezují oblast, pracovní oblast vytlačovacího stroje, jak ukazuje obr. 21. Celou tuto oblast nelze zpravidla využít, neboť se také respektují hranice kvality a hospodárnosti. Za předpokladu konstantní teploty taveniny, jsou charakteristiky vytlačovacího stroje přímkami, kde průsečík s

osou y udává volný výtok, případně průsečík s osou x situaci, kdy je výtok zcela uzavřen.



Obr.21 Charakteristika vytlačovacího stroje [8]

Průběh tlaku po délce šneku může být různý podle toho, zda řídicím pásmem na šneku je pásmo vstupní (křivka a), přechodové (křivka b) nebo výstupní (křivka c). Tento průběh je zobrazen na obr. 22.



Obr. 22 Průběh tlaku po délce šneku – charakteristiky vytlačovacího procesu [8]



2.7 Teoretický návrh optimální geometrie šneku [3]

Cíl návrhu šneku je zaručit největší stupeň vytlačovaného množství na výstupu s přijatelnou kvalitou taveniny. Bohužel, vysoký výstupní výkon a kvalita míchání jsou, do jisté míry, konfliktní požadavky. Jestliže se vytlačované množství zvyšuje, čas, který stráví polymer ve stroji se sníží a tím samozřejmě čas k promíchání taveniny. V důsledku toho, kvalita míchání klesá.

Je také důležité uvědomit si, že všechny funkční zóny vytlačovacího stroje jsou vzájemně závislé. Tudíž, před projektováním nového šneku nahrazujícího stávající šnek, by mělo být určeno, která část vytlačovacího stroje bude rozhodující.

Optimalizace pro dopravu taveniny

V návrhu geometrie výstupní sekce hraje velkou roli hloubka kanálu. Návrh optimální hloubky vychází z rovnice:

$$\frac{\partial \dot{Q}}{\partial H} = 0 \quad (17)$$

Objemové množství dodávané taveniny pro Newtonovu tekutinu, je dán rovnicí 15, zahrnující geometrii šneku. Uvažujeme-li šířku kanálu $W = (\pi D \sin \varphi / p) - w$ (18), rychlost taveniny v kanálu $v_{bz} = \pi D N \cos \varphi$ (19) a tlakový gradient v kanálu $g_z = g_a \sin \varphi$ (20), kde g_a je axiální tlakový gradient, rovnice pak může být napsána jako:

$$\dot{Q} = 0.5 \pi D N H (\pi D \sin \varphi \cos \varphi - p w \cos \varphi) - \frac{H^3 P}{12 \eta L} (\pi D \sin^2 \varphi - p w \sin \varphi) \quad (21)$$

Axiální tlakový gradient:

$$g_a = P / L \quad (22)$$

kde:

\dot{Q} – výkon [m^3/hod], D – průměr šneku [m], H – hloubka kanálu výstupní sekce [m], N – rychlost šneku [hod^{-1}], φ – úhel stoupání šroubovice [$^\circ$], p – počet chodů šneku [-], w – šířka závitů [m], P – tlak [m], L – délka přes kterou se mění tlak [m], η – dynamická viskozita [$Pa.s$]



Viskozita taveniny polymeru η bude záviset na lokální smykové rychlosti v kanálu. Jestliže se předpokládá chování taveniny polymeru podle mocninového zákona, viskozitu dostaneme:

$$\eta = k \left(\frac{\pi DN}{H} \right)^{n-1} \quad (23)$$

Optimální hloubka kanálu H může být nyní stanovena:

$$H = \left[\frac{6(\pi DN)^n k L}{(n+2) P \tan \varphi} \right]^{\frac{1}{n+1}} \quad (24)$$

D – průměr šneku přes závit [m], H [m] – hloubka kanálu, N – otáčky šneku [s^{-1}], k – koeficient konzistence [$Pa \cdot s^n$], n – index mocninového zákona [-]

Optimální hloubka závisí na průměru, rychlosti šneku, indexu mocninového zákona, indexu konzistence, tlakovém gradientu a úhlu stoupání šroubovice.

Uvažujeme-li současně optimalizovanou hloubku kanálu a úhel stoupání šroubovice, optimální úhel stoupání šroubovice může být:

$$\sin \varphi = \left(\frac{n}{2n+2} \right)^{1/2} + \hat{w} \left(\frac{n+2}{4n} \right) \quad (25)$$

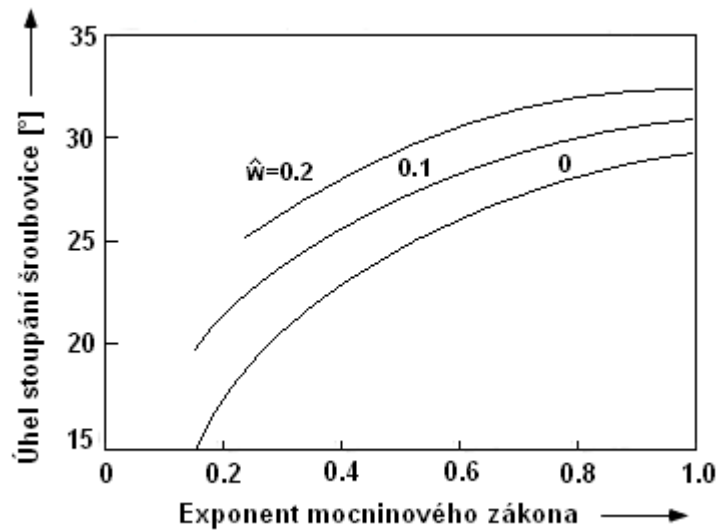
kde n je exponent mocninového zákona a \hat{w} je redukovaná šířka ramena:

$$\hat{w} = \frac{pw}{\pi D} \quad (26)$$

kde:

\hat{w} redukovaná šířka ramena [m], p je počet závitů [-], w kolmá šířka závitu [m], a D průměr šneku [m]

Optimální úhel stoupání šroubovice je funkce indexu mocninového zákona a redukované šířky ramena. Obr. 23 ukazuje optimální úhel stoupání šroubovice, jako funkci indexu mocninového zákona v různých hodnotách redukované šířky ramena.



Obr. 23 Optimální úhel stoupání šroubovice v závislosti na exponentu mocninového zákona

Bohužel, optimální hloubka kanálu je závislá na mnohem víc proměnných než na optimálním úhlu stoupání šroubovice. Závisí na indexu mocninového zákona a redukované šířce ramena. Navíc k těmto proměnným i na optimální hloubce kanálu a také na rychlosti šneku, průměru šneku, koeficientu konzistence a tlakovém gradientu. Toto znamená, že není možné navrhnout všeobecně optimální geometrii šneku. Tudíž, se musí určit nejvíce pravděpodobný provozní parametr, který šneku vyjde vstříc při návrhu těchto parametrů.

Mělo by se poznamenat také to, že není zcela korektní vzít výraz odvozený pro Newtonovu tekutinu a dosadit viskozitu z mocninového zákona do toho výrazu. Je-li vypočítána optimální hloubka a úhel stoupání šroubovice pro pseudoplastickou tekutinu s použitím výrazů platných pouze pro Newtonovu tekutinu, mohou se do výpočtů vnášet chyby, zvláště je-li exponent mocninového zákona jedna polovina či méně. Proto je velmi důležité brát pseudoplastické chování na vědomí, protože velká většina polymerů je silně Neneutronovská.

Optimalizace pro plastikaci

Důležitým faktorem pro plastifikaci je celková axiální délka kompresní sekce. Celková axiální délka tavící sekce může být stanovena z rovnice:

$$L_T = \frac{H_f v_{sz} \rho_s \sqrt{W_1} \sin \varphi}{\Omega_1} \left(2 - \frac{A_1 v_{sz} \rho_s \sqrt{W_1} \sin \varphi}{\Omega_1} \right) \quad (27)$$



Počáteční šířka lůžka pevné látky W_1 je:

$$W_1 = \frac{\pi D \sin \varphi}{p} - w \quad (28)$$

Rychlost lůžka pevné látky může být vyjádřena jako:

$$v_{sz} = \frac{\dot{M}}{\rho_s H_f (\pi D \sin \varphi - pw)} \quad (29)$$

Výraz Ω_1 může být napsaný jako:

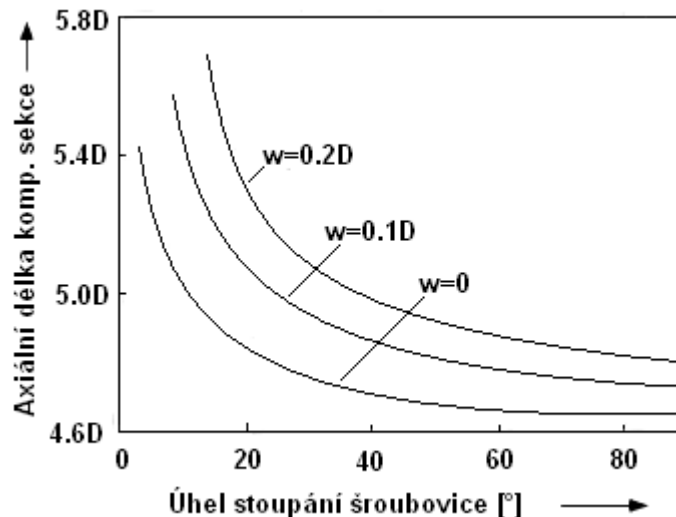
$$\Omega_1 = \left[\frac{[2k_m \Delta T_b + \eta(v_0^2 + v_{sz}^2 - 2v_0 v_{sz} \cos \varphi)] \rho_m v_0 \sin \varphi}{2\Delta H} \right]^{1/2} \quad (30)$$

kde:

H_f [m] – hloubka kanálu, v_{sz} – rychlost lůžka pevné látky [m.s^{-1}], ρ_s – hustota polymeru v pevném stavu [kg.m^{-3}], W_1 – počáteční šířka lůžka pevné látky [m], A_1 – komprese v axiálním směru [m], φ – stoupání šroubovice [°], D – průměr šneku přes závit [m], w – šířka závitu ve směru kolmém na závit [m], p – počet chodů šneku [-], \dot{M} – dodávané hmotnostní množství [kg.hod^{-1}], ρ_m – hustota taveniny polymeru [kg.m^{-3}], v_0 – obvodová rychlost šneku [m.s^{-1}], k_m – tepelná vodivost PA [$\text{J/ms}^\circ\text{C}$], η – viskozita [Pa.s], ΔH – rozdíl entalpií [J.kg^{-1}]

S těmito rovnicemi, může být stanovený efekt různých geometrických proměnných. Obr. 24 ukazuje celkovou délku kompresní sekce jako funkci úhlu stoupání šroubovice při různých šířkách závitu.

Výsledky ukázané na obr. 24 platí pro vytlačovací stroj $\varnothing 50\text{mm}$, pracujícím při otáčkách šneku 100s^{-1} s výtěžkem 100kg/hod , teplota válce je nastavena 50°C nad bodem tání polymeru. Hloubka kanálu v dopravní sekci je 5 mm, axiální komprese $A = 0.008\text{m}$, a počet závitu je 1.



Obr. 24 Axiální délka kompresní sekce versus úhel stoupání šroubovice

Efekt úhlu stoupání šroubovice

Z obr. 24 je vidět, že se délka kompresní sekce strmě snižuje s malou změnou úhlu stoupání šroubovice. U větších úhlů stoupání šroubovice, se snižuje délka sekce méně s úhlem stoupání. Velmi malé zlepšení je získané zvyšováním úhlu stoupání šroubovice za 30° . Délka sekce se zvětšuje se zvětšující se šířkou ramena, zvláště v malém úhlu stoupání šroubovice. Z grafické závislosti je zřejmé, že neexistuje optimální úhel stoupání šroubovice, pro něhož je axiální délka kompresní sekce minimální. Nejkratší délku sekce získáme při úhlu stoupání šroubovice 90° ; nicméně, délka sekce při 90° je jen asi o 3% menší než délka při 30° a asi o 8% menší než délka při 17.66° (čtvercová rozteč). Vzhledem k tomu, že úhel stoupání šroubovice 90° neprodukuje žádnou dopravu materiálu, je nesmyslné používat tento extrémní úhel.

Efekt vůle mezi válcem a závitem

Tavící výkon se snižuje se stoupající radiální vůlí. Vzhledem k tomu, že standardní vůle bývá $0.001D$; zdvojnásobení standardní vůle způsobuje snížení tavícího poměru asi 25%. Ztrojnásobení standardní vůle způsobuje snížení tavícího poměru asi 35%. Je zřejmé, že opotřebení v kompresní sekci vytlačovacího stroje má nežádoucí účinek na tavící výkon. Proto je důležité, ujistit se, že je radiální vůle v této sekci v rozumné hranici. Bohužel, opotřebení šneku a válce se často vyskytuje v kompresní zóně vytlačovacího stroje. Tento typ opotřebení nepříznivě ovlivňuje tavící výkon a tudíž snižuje celkové technické parametry extrudéru. Příznak tohoto opotřebení může být teplotní nehomogenita a kolísání tlaku. Jestliže tyto problémy nastanou,



dobré zkontrolovat opotřebení šneku a válce. Jestliže je vůle dva až třikrát větší než standardní vůle, měli by se šnek nebo válec nahradit.

Efekt kompresního poměru

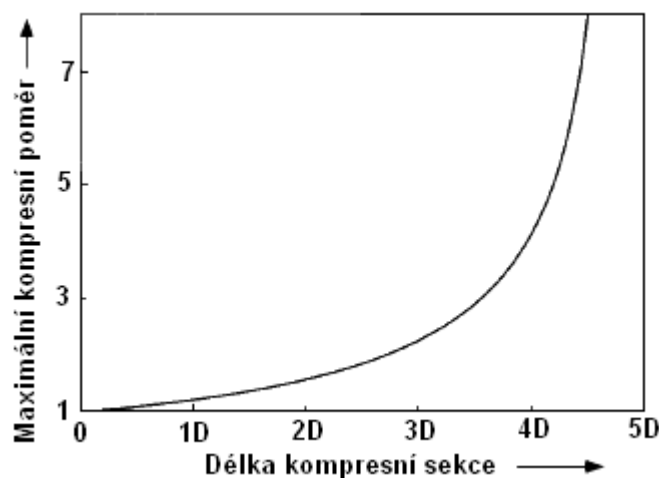
Tavení má sklony snížit šířku lůžka pevné látky. Jestliže je komprese příliš rychlá, tavení může být nedostatečné a lůžko pevné látky může růst do šířky. Toto obecně způsobí ucpání kanálu lůžkem pevné látky a pokud je možné, měli bychom se tomuto problému vyhnout. Ucpávání způsobuje kolísání výkonu, toto kolísání však také může způsobovat opotřebovaná kompresní sekce.

Kompresní poměr X_c je uváděna jako hloubka kanálu v dopravní sekci dělená hloubkou kanálu ve výstupní sekci. Axiální délka kompresní sekce je L_c . Tudíž, aby se vyloučilo ucpávání, by se měla řídit délka kompresní sekce následující nerovnicí:

$$L_c > \frac{v_{sz} \rho_s \sqrt{W_1} H_f (X_c - 1) \sin \varphi}{\Omega_1 X_c} \quad (31)$$

H_f [m] hloubka kanálu, v_{sz} – rychlost lůžka pevné látky [$m \cdot s^{-1}$], ρ_s – hustota polymeru v pevném stavu [$kg \cdot m^{-3}$], φ – stoupání šroubovice [°], W_1 – počáteční šířka lůžka pevné látky [m], X_c – kompresní poměr [-]

Z rovnice 31, může být stanovena minimální přípustná délka kompresní sekce, jestliže známe kompresní poměr. Obr. 25 ukazuje minimální délku L_c v závislosti na kompresním poměru pro příklad užívaný dříve.



Obr. 25 Závislost kompresního poměru na délce kompresní sekce

Jestliže máme velký kompresní poměr, délka kompresní sekce musí být dost dlouhá, aby se vyloučilo ucpání.

Z tohoto důvodu, bychom se měli vyhnout velmi příkrým kompresním sekcím. Jeden z mýtů v navrhování šneků pro určité polymery, např. polyamid, je to, že nutně potřebuje velmi strmý kompresní šnek k tomu, aby vytlačoval správně. Mnoho šneků bylo navrženo s kompresní délkou menší než jeden průměr. Takový šnek může pracovat pouze tehdy, proběhla-li většina tavení před kompresní sekcí. Prudký kompresní šnek nemá moc smysl z funkčního hlediska, protože je náchylný ke kolísání výkonu a opotřebením. Je důležité si uvědomit, že polymery obecně nevyžadují prudké kompresní šneky, to bylo založeno na mylném názoru. Samozřejmě, velmi rychlá komprese je možná ve druhém stupni dvojstupňového šnekového extrudéru, protože v podstatě celé tavení by mělo probíhat v prvním stupni.

Optimalizace pro dopravu pevné látky

Proces optimalizace dopravy pevné látky je velmi důležitý, protože doprava pevné látky je základ celého procesu plastikace. Jestliže se vyskytuje nestabilita v dopravní zóně, tato nestabilita bude prostupovat do dalších zón a způsobovat kolísání výkonu a tlaku. Jak již bylo prodiskutované v kapitole 2.4, axiální drážkování válce poskytuje dobrý prostředek pro zlepšení dopravy pevné látky a pro její stabilitu. Zde jsou prodiskutované důležité úvahy pro optimalizaci dopravy pevné látky zohledňující design šneku.

Efekt hloubky kanálu

Optimální hloubka kanálu může být zhodnocena použitím číslíkové nebo grafické metody. Optimální hloubka kanálu se zvyšuje se zvyšujícím součinitelem tření na válci. Snížení součinitele tření na šneku počtem závitových ramen, a tlakový spádem. Zvyšuje-li se tlakový spád, optimální kanálová hloubka se snižuje. Bohužel, aktuální součinitelé tření jsou obecně neznámé kvůli značné míře nepřesnosti; čili, přesné určení optimální hloubky kanálu je obvykle nemožné. Hloubka kanálu v dopravní části šneku použitých v hladkém válci extrudéru je často kolem 0.15 až $0.20D$, v drážkovaném válci je hloubka v dopravní sekci $0.1D$.

Efekt úhlu stoupání šroubovice

Úhel stoupání šroubovice v dopravní sekci bude také mít optimální hodnotu pro které poměr dopravy pevné látky dosáhnou maximum. Toto je zřejmé jestliže si uvědomíme, že nulový stupeň úhel stoupání šroubovice má za následek nulovou dávku a 90° úhel stoupání šroubovice má za následek



také nulovou dávku. Tudíž, někde mezi nulou a 90° , poměr dopravy pevné látky dosáhnou maxima.

Rovnice pro určení optimálního stoupání šroubovice pro dopravu pevné látky nemá vhodné analytické řešení. Proto, optimální úhel stoupání šroubovice může být určený používáním numerické nebo grafické metody. Znovu potřebujeme znát součinitele tření, aby byl určen optimální úhel stoupání šroubovice. Proto, je přesný návrh optimálního úhlu stoupání šroubovice obvykle nemožný. Ve většině vytlačovacích šneků, úhel stoupání šroubovice v dopravní sekci v rozsahu od 15° do 25° , s nejběžnějším úhlem 17.66° .

Efekt počtu chodů závitů

Rostoucí počet paralelních závitů snižuje otevřenou plochu průřezu kanálu a zvětšuje styčnou plochu mezi pevným lůžkem a šnekem. Oba tyto faktory mají záporný vliv na výkon dopravy pevné látky, zvláště je-li úhel stoupání šroubovice relativně malý.

Efekt radiální vůle

Jestliže granulové polymerní složky jsou stlačeny do lůžka pevného tělesa, nebude prakticky docházet k prosakování toku skrz vůli. V mnoha případech, je vůle menší než velikost granulí polymeru. Tudíž, i když složky polymeru nejsou plně stlačeny, současná radiální vůle obecně nebude příliš rozhodující pro výkon dopravy pevné látky.

Efekt geometrie křídla

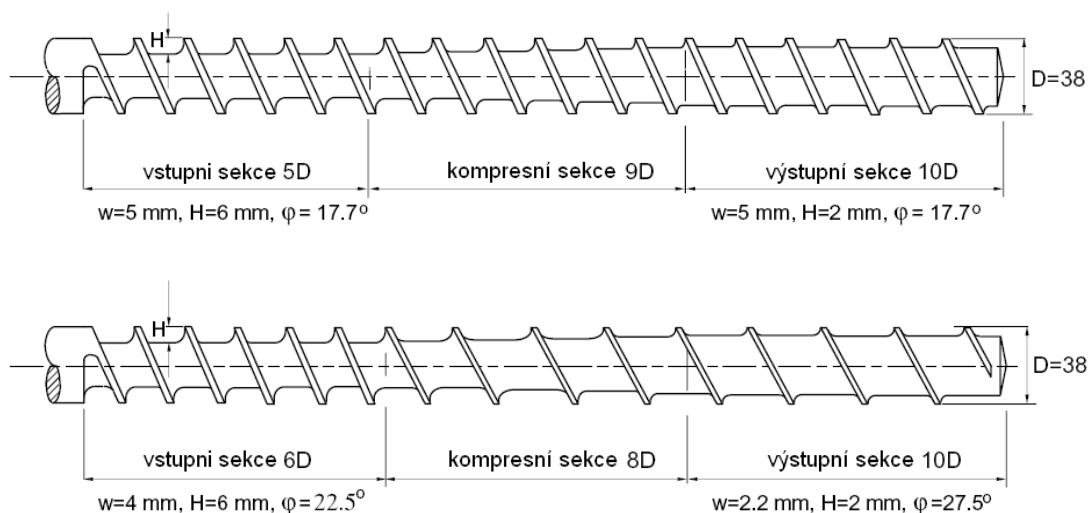
Dekker studoval efekt různých geometrií ramena na výkon dopravy pevné látky. Zjistil, že mnoho nestability vytlačování může být dáno vnitřní deformací lůžka pevné látky. Vnitřní deformace nejpravděpodobněji nastane, je-li vnitřní součinitel tření složek polymeru nízký. Kulovité částice mají nižší vnitřní součinitel tření než nekulové složky a jsou, proto více náchylné k vnitřní deformaci lůžka pevné látky.

Dekker srovnával lichoběžníkovou geometrii ramena se standardním obdélníkovou geometrií ramena. Zjistil, že lichoběžníková geometrie měla za následek vyšší výkonnost a stabilnější výkon vytlačování, zvláště při vysokých otáčkách šneku. Další důležitá výhoda pro tuto geometrii ramena je, že plocha styku mezi lůžkem pevnou látkou a šnekem je snižena. To by mělo být dodatečný kladný účinek pro dopravu pevné látky.

Spalding studoval účinek poloměrů zaoblení na bocích ramen na dopravu pevné látky. Zjistil, že větší poloměry zlepšily dopravu pevné látky, přičemž bude vysoká úroveň tlakového vývoje v dopravní zóně. Doporučuje používat poloměry boku ramen asi $1/4$ hloubky kanálu v dopravní sekci.

Poloměr boku ramen do $0.25H$ jsou ještě dost malé pro dopravu. Poloměry mezi 0.5 až $1.0H$ mají obecně za výsledek lepší technické parametry než poloměry do $0.25H$, protože větší rádiusy poskytují jemnější přechod od kořene šneku k boku ramena. Také to vytvoří větší zvláštní normálovou sílu na povrchu válce, která zvýší hnací sílu působící na lůžko pevné látky.

Pro srovnání je na obr. 26 ukázaný původní šnek průměru 38mm , s délkou $24D$ a šnek optimalizovaný dle uvedeného návodu. Hlavní rozdíl je v měnícím se úhlu stoupání šroubovice.



Obr. 26 Srovnání původního šneku s optimalizovaným šnekem

2.8 Vlastnosti polyamidu

2.8.1 Charakteristika polyamidu [12]

Polyamidy (PA) jsou lineární polymery obsahující v řetězcích amidové skupiny $-\text{CONH}-$. Nejznámější a nejrozšířenější jsou polyamidy alifatické, na trhu však existují i polyamidy aromatické. Makromolekuly jsou propojovány vodíkovými můstky mezi amidovými skupinami, jejichž počet ovlivňuje krystalickou strukturu, T_m , T_g a další vlastnosti. Aplikace polyamidů jako plastů i vláken využívají jejich vysoké houževnatosti, tvrdosti, odolnosti proti otěru a dobrých elektroizolačních vlastnostech. Mechanické vlastnosti jsou závislé na typu PA, molekulové hmotnosti a obsahu vody. Nasákavost polyamidů vodou je značná a roste s relativní koncentrací amidových skupin.

Alifatické PA lze zpracovat všemi postupy obvyklými pro termoplasty i zvláknovat z taveniny. Lze je svařovat, lepit, potiskovat i pokovovat.

K označování alifatických polyamidů byl zaveden systém, který udává počet uhlíkových atomů ve stavebních jednotkách řetězců. Tak PA6 je polyamid z jediného (cyklického) monomeru s 6 uhlíky (ϵ -aminokaprolaktamu); pokud je PA ze dvou monomerů, první číslo určuje počet atomů uhlíku v diaminu, druhé v dikarboxylové kyselině: PA66 je polyamid z hexamethyldiaminu a kyseliny adipové; PA610 z hexamethyldiaminu a kyseliny sebakové.

Polyamid 66 je nejdůležitějším zástupcem polyamidů vyráběných polykondenzací diaminů a dikarboxylových kyselin. Polykondenzace probíhá podle následujícího mechanismu, kde prvním stupněm je vznik soli z ekvimolárního množství diaminu a dikarboxylové kyseliny a ve druhém stupni nastává polykondenzace dalším zahříváním soli v inertní atmosféře. PA66 má ve srovnání s PA6 výhodu ve vyšší teplotě tání, poněkud vyšší pevnosti a nižší navlhavosti. PA66 slouží v širokém měřítku jako konstrukční termoplast i jako materiál pro výrobu vláken a fólií.

Polyamid 6, $(\text{NH}-(\text{CH}_2)_5-\text{CO})_n$ – z cyklických laktamů má pro svoji dostupnost největší význam 6-kaprolaktam (také nazývaný ϵ -kaprolaktam). Polymerace laktamů se uskutečňuje hydrolyticky nebo (méně často) alkalicky. Mechanismus hydrolytické polymerace 6-kaprolaktamu je zvláštním druhem stupňovité polyadice. Polyamid 6 je tvrdá, světle žlutá hmota tající při 215 až 220°C na kapalinu o velmi nízké viskozitě. Má dobré mechanické vlastnosti, nízký koeficient tření a výbornou otěruvzdornost, dobrou rázovou houževnatost a elektroizolační vlastnosti. Nevýhodou je značná navlhavost. Používá se pro výrobu vláken i jako konstrukční materiál. PA6 se zvlákní z taveniny protlačováním tryskami s následným dloužením a praním (zbavování monomeru). Vyrábějí se hedvábná vlákna, stříž, kordy do pneumatik, kobercová vlákna, monofily aj. Vlákna mají značnou pevnost, odolnost proti otěru, dobře se barví, avšak mají sníženou odolnost vůči povětrnostnímu stárnutí. Polyamid 6 se používá jako konstrukční materiál pro výrobu ozubených kol a ložisek a dalších výrobků, kde se uplatní nízký koeficient tření.

2.8.2 Potíže spojené s vlastnostmi polymeru [13]

Kvůli jeho nízké molekulární hmotnosti, je studium vytlačování polyamidu velmi delikátní. Zatímco je tekutost polymeru v tekutém stavu relativně vysoká, může teplotní změna několik stupňů ovlivnit významně proces. Teplotní pole vytlačování je totiž úzké a omezené.

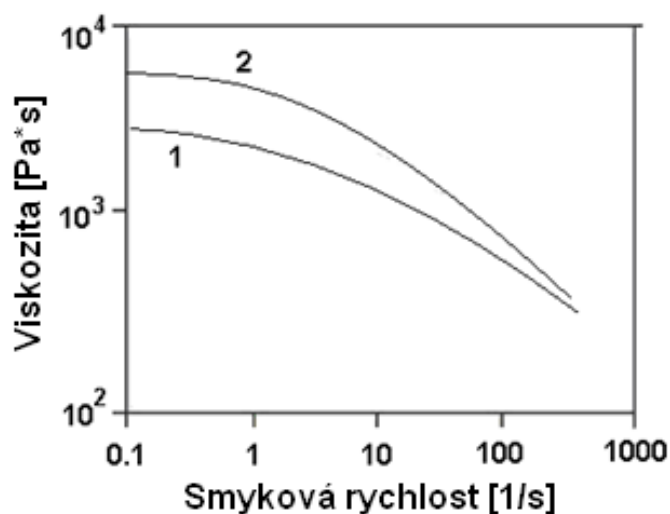
Jestliže není dost vysoká teplota vytlačování, roztavený polymer nebude dostatečně homogenní, a některé krystalické části mohou zůstat neroztavené. Tato neroztavená krystalická fáze může poté zahájit rekrystalizaci během chladicího procesu, a může mít za následek

nestejnorodou morfologii. Obráceně, jestliže teplota vytlačování bude příliš vysoká, mohou nastat dva možné problémy. Zvýšení rizika degradace, to může být obtížné při vytlačování kvůli nízké viskozitě polymeru.

Polykondenzace

Vytlačování polyamidů je obecně doprovázené dodatečnou polykondenzací. Tento jev je výraznější není úplně dokončena počáteční polymerace (syntéza) následkem nepřiměřených výrobních podmínek. Výsledkem toho může být nízká molekulární hmotnost, široká distribuce molekulové hmotnosti nebo přítomnost monomerů nebo oligomerů, které se nezúčastnily polymerace s velmi nízkými molekulovými hmotnostmi.

Obr. 27 znázorňuje viskózní křivky polymeru před a po vytlačování, získané reologickými testy. Tato závislost ukáže, že viskozita polymeru (a následná průměrná molekulární hmotnost) se zvyšuje významně následujícím vytlačováním. Toto zvýšení molekulární hmotnosti může mít za následek dodatečná polykondenzace.



Obr. 27: Viskozita polyamidu v závislosti na smykové rychlosti při 230°C, před (1) a po (2) vytlačování [12]

2.8.3 Potíže spojené s vytlačovacím procesem [13]

Sušení

Schopnost pohlcovat vodu je u polyamidu je relativně vysoká. V nasyceném stavu, tento konstrukční typ polymeru může při teplotě okolí



obsahovat mezi 3 až 8% vody jeho váhy. Dodávaný, má polymer záměrně absorbováno asi 1% vody z jeho váhy.

Roztavený polymer vstřebává až 4.5 až 10% vody ve vodní chladicí lázni po opuštění vytlačovací hlavy. Množství pohlcené vody může být ovlivňováno několika faktory, zahrnující teplotu taveniny polymeru, vzdálenost mezi lisem a chladicí lázní, rychlost toku taveniny polymeru, a teplotu vody chladicí lázně. Působí jako změkčovaadlo, voda může měnit mechanické vlastnosti.

Chlazení

Morfologie semikrystalických polymerů závisí na rychlosti chladnutí, zvláště když je rychlost krystalizace velmi nízká. Mimo jiné také proto, že má polymer nízkou tepelnou vodivost, což způsobuje značný rozdíl teploty na povrchu a uvnitř vytlačovaného profilu. V případě semikrystalických polymerů, bylo dokázáno, že tato difference rychlosti chladnutí může, po vytlačování nebo vstřikování, způsobit formování velmi tenkých vrstev s různou morfologií na povrchu.

To znamená, že musí být rychlost krystalizace polyamidu relativně vysoká. Následkem toho, se zdá být povrchový jev méně významný než u jiných materiálů.

Teploty v zónách vytlačovacího stroje

Vytlačovací stroj má tři nebo čtyři různé teplotní zóny, v závislosti na délce šneku. Určování vhodné teploty pro každé pole může být jeden z nejdůležitějších výzev výroby. Záleží na několika různých parametrech:

- Molekulární váha (viskozita) polymeru.
- Bod tání krystalové- fáze polymer. Teplota musí být dost vysoká, aby byly roztaveny všechny krystaly polymeru a vyloučila se krystalizační paměť, aby bylo dosaženo taveniny, která je stejnorodá a homogenní.
- Stálost polymeru. Jestli je teplota příliš vysoká, polymer může degradovat. V první zóně (doprava polymeru) vytlačovacího stroje, přítomnost kyslíku nebo vzduchu, může urychlovat tuto termální oxidaci.
- Tok polymeru přes hlavu. Je důležité mít nepřetržitou a stálou rychlost toku. Teplota vytlačovacího stroje, stejně jako teplota hlavy, má významný účinek na tuto rychlost toku.



Tření mezi polymerem a kovem

V dopravní zóně, kvůli specifickému reologickému chování, může být, polymer buď jako granulát nebo prach, rychle stlačen nebo spečen tlakem a teplotou, a může se dostat do prostoru mezi šnekem a válcem. Toto vsunutí, závisí na tření mezi polymerem a kovem. Toto znamená, že na jedné straně, záleží na viskozitě polymeru (a smykové síle) a na druhé straně, to souvisí s drsností kovového povrchu.

Dva extrémní příklady ukážou úlohu součinitele tření mezi polymerem a kovem. V prvním případě, se polymer dokonale přilepí na šnek, ale smýká se po válci. Závit se pak pozvolna ucpává a po několika minutách se funkce tečení zastaví úplně.

Ve druhém případě se polymer smýká dokonale po šneku, ale přilepí se k válci. Následkem toho, může být postačující tok, ale šnek může být zablokovaný kvůli vysokému vstupnímu krouticímu momentu.

Faktory ovlivňující tok roztaveného polymeru

Tok roztaveného polymeru je řízený šnekovým poměrem. Tento poměr závisí na pěti faktorech:

- Smyková rychlost a smykové napětí
- Teplota tání
- Hydrostatický tlak v roztaveném polymeru
- Molekulová hmotnost a molekulová distribuční hmotnost
- Přísady jako kamenné moučky, maziva, atd.

3 Experimentální část

Firma ANAH + SK, s.r.o. se zabývá především výrobou plastových svařovacích drátů z polypropylenu. Vytlačování provádí na stroji Typu 14071/P2, Ø32. Stroj je opatřen šnekem Ø32, s délkou 20D. Technické parametry stroje a šneku jsou uvedeny níže. Firma chce zavést výrobu svařovacích drátů také z polyamidu. Bylo provedeno několik pokusů vytlačování polyamidu s původním šnekem sloužícím pro vytlačování PP, to prokázalo nevhodnost toho šneku pro aplikace pro polyamid. Výsledky z těchto pokusů budou taktéž uvedeny níže.

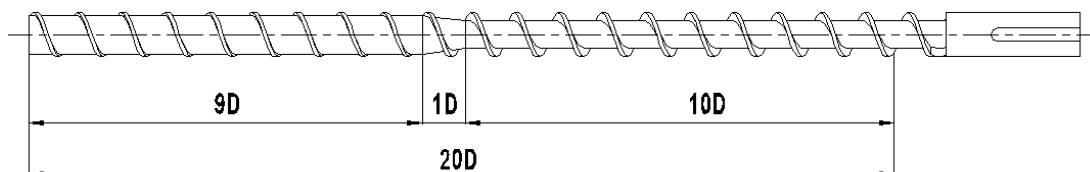
3.1 Základní technické údaje vytlačovacího stroje [16]

Rozměry původního šneku Ø32:

Tab.1 Rozměry šneku používaného pro PP

Průměr válce	$D = 32\text{mm}$
Celková délka šneku	$L = 20D = 640\text{mm}$
Délka dopravní sekce	$L_f = 9D = 288\text{mm}$
Délka kompresní sekce	$L_k = 1D = 32\text{mm}$
Délka výstupní sekce	$L_m = 10D = 320\text{mm}$
Hloubka dopravní sekce	$H_f = 6\text{mm}$
Hloubka výstupní sekce	$H_m = 2\text{mm}$
Šířka závitu	$e = 3\text{mm}$
Rozteč	$t = 1D = 32\text{mm}$
Stoupání šroubovice	$\varphi = 17,66^\circ$
Počet chodů šneku	$p = 1$
Kompresní poměr šneku	$X_c = 3:1$
Radiální vůle	$\delta = 25\ \mu\text{m}$

Na obr. 28 je zobrazen původní šnek s uvedením délek jednotlivých zón.



Obr. 28 Rozdělení délky původního šneku

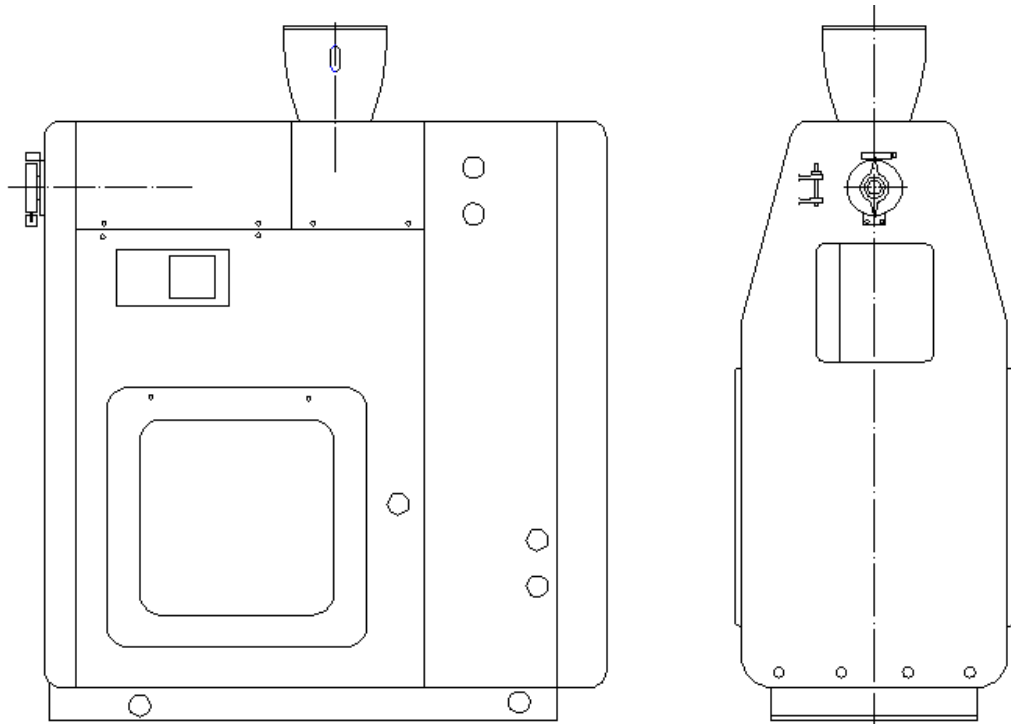


Tvar ramena závitu je standartní obdélníkový.

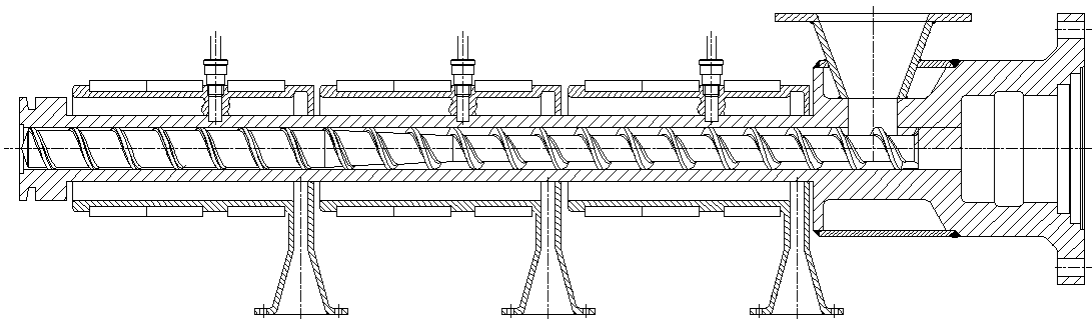
Šnek je opatřen nitridační povrchovou úpravou, což ve spojení s nitridovaným pracovním válcem umožňuje uložení s minimální vůlí bez nebezpečí zadření.

Uložení šneku ve válci je provedeno v toleranci H8/f8.

Pro představu je na obr. 29 zobrazen vytlačovací stroj pro, který se šnek navrhoval. Vzájemné uspořádání pracovního válce a topných pásem ukazuje obr. 30.



Obr. 29 Vytlačovací stroj $\varnothing 32$, Typ 14071/ P2 [13]



Obr. 30 Uspořádání topných pásem stroje [13]



Technické údaje vytlačovacího stroje Typ 14071/ P2, Ø32:

Průměr šneku	D = 32 mm
Délka šneku	L = 20D
Maximální axiální tlak.....	250 atp
Celkový rozsah otáček šneku.....	8 – 250 ot/min
plynule měnitelné dle motorizace:	

a) Variátor 12.311.72 – regulace EDH

příkon hlavního elektromotoru	1,5 kW
příkon elektromotoru EHD	0,18 kW
otáčky šneku	8 – 48 ot/min

b) Variátor 32.212.80 – regulace EDV

příkon hlavního elektromotoru	4 kW
příkon elektromotoru EHD	0,18 kW
otáčky šneku	25 – 150 ot/min

c) Variátor 32.212.80 – regulace EDV

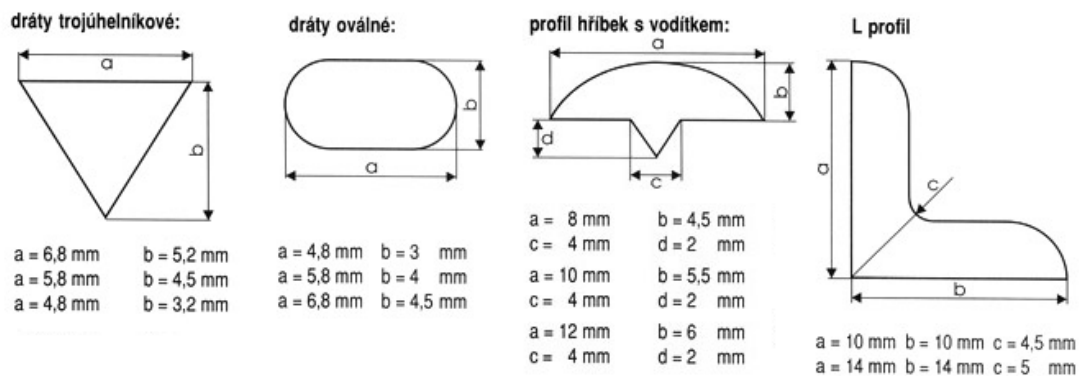
příkon hlavního elektromotoru	4 kW
příkon elektromotoru EHD	0,18 kW
otáčky šneku	50 – 250 ot/min

Příkon motorů chladících ventilátorů.....	3 x 0,09 kW
Příkon topných okruhů pracovního válce.....	3,15 kW
Rozsah měřících přístrojů.....	20 – 300 °C
Zaručená přesnost regulace teploty.....	± 2°C

Pracovní válec je vytápěn elektrickými pásovými topnými tělesy a chlazen vzduchem, s možností regulace ve třech pásmech. Plnicí otvor je chlazen vodou.

Svařovací dráty [14]:

Firma Anah + SK s.r.o. vytlačuje kruhové profily drátů do průměru 5mm a další profily, které jsou ukázané na obr. 31.



Obr. 31 Používané profily vytlačovaných svařovacích drátů [14]

3.1.1 Zkouška vytlačování PA původním šnekem:

Při zkoušení vytlačování polyamidu tímto šnekem byly vyzkoušeny tři varianty nastavení teplot topných pásem stroje. Toto nastavení bylo prováděno v rozmezí doporučených hodnot od výrobce polyamidu. Při zkoušení se také měnil rozsah otáček - od minimálních otáček k maximálním.

Varianta 1:

Teplota topných pásem

	Pásmo 1	Pásmo 2	Pásmo 3
Teplota [°C]	190	240	260

Výsledky zkoušky:

Protože stroj není opatřen tlakovými čidly a vyjmutí zaplněného šneku z válce je dosti obtížná záležitost, musela být vzdálenost, kam se zpracovávaný materiál dostal, určována podle množství granulátu, které se do válce dostalo.

S tímto nastavením proběhla zkouška s nejhorším výsledkem. Podle nabraného množství, se dalo zhruba určit, že materiál zaplnil dopravní sekci a při vstupu do kompresní sekce se další posun materiálu v před zastavil.

I přes dostatečně dlouhou vstupní sekci, ve které po stlačení granulí v pevnou zátku může probíhat i pozvolné tavení, hlavně tedy na styčné ploše mezi zátkou a stěnou válce, nedokázal materiál překonat krátkou strmou kompresní sekci.

Při změně otáček se neprojevil žádný větší rozdíl. V tomto případě se byly maximální otáčky nastaveny na 100 ot/min, neboť při vyšších otáčkách by mohlo dojít k poškození šneku.



V další variantě nastavení topných pásem se tedy zvýšila teplota dopravní sekce, pro podpoření většího předtavení. Současně se zvýšila teplota v kompresní sekci.

Z extrudéru se uvízlý materiál vytlačoval poměrně zdlouhavým procesem s použitím směsi PE s emulzí.

Varianta 2:

Teplota topných pásem

	Pásmo 1	Pásmo 2	Pásmo 3
Teplota [°C]	200	250	260

Výsledky zkoušky:

Při tomto nastavení se očekávalo zlepšení průběhu vytlačování. To se však nepotvrdilo. Materiálu se dostalo do extrudéru pouze o malé množství více, z čehož se usoudilo, že materiál postoupil dále než v první variantě, avšak došlo opět k ucpání šneku a posun se opět zastavil.

Z druhého pokusu bylo více méně jisté, že tento šnek nebude pro PA vhodný. Avšak pro potvrzení byl proveden ještě poslední pokus, tentokrát se zachovala teplota v dopravní sekci na stejné teplotě a zvýšila se teplota v kompresní sekci.

Varianta 3:

Teplota topných pásem

	Pásmo 1	Pásmo 2	Pásmo 3
Teplota [°C]	200	260	260

Výsledky zkoušky:

Tentokrát se vzdálenost materiálu ve válci nijak výrazně nezvětšila a materiál se opět zastavil v kompresní sekci. Tím se potvrdilo, že je šnek pro tuto aplikaci nevhodný.

3.2 Řešení stávajícího problému

Jelikož ani v jedné z variant nastavení topných pásem extrudér nedodával taveninu polymeru (protože materiál nikdy nedotekl do vytlačovací hlavy a docházelo k ucpávání šneku), je zjevný problém v krátké vytlačovací sekci. To také potvrdil odborník z oboru. Tato sekce je příliš strmá a tudíž celý objem materiálu není schopen během takové krátké dráhy přejít do plastického stavu.



Pracoval-li by šnek s tzv. nucenou dopravou materiálu, čili by byl opatřen axiálním drážkováním válce ve vstupní sekci, vznikl by dostatečný tlak potřebný pro posun materiálu šnekem, účinkem něhož by se protlačil materiál skrz kompresní zónu, kde by tavení proběhlo ve větší intenzitě a pevné lůžko by neucpávalo šnekový kanál.

Toto však není možné z důvodu konstrukce stávajícího stroje, jehož válec nejde upravit. Celý válec je totiž z jednoho kusu a úpravu tudíž nelze provést. Drážkovanou vstupní sekci nedoporučuje ani výrobce PA.

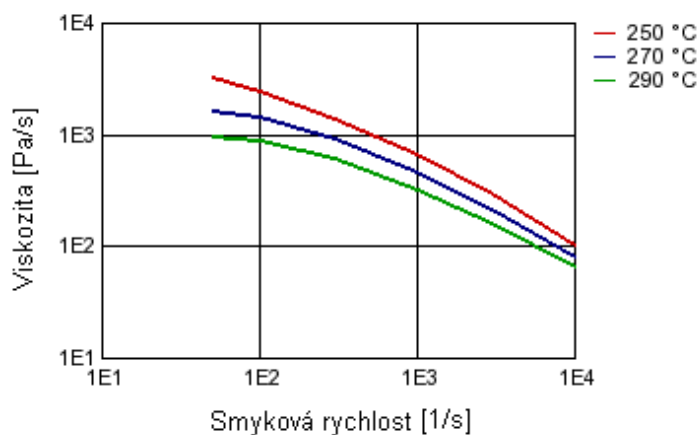
3.2.1 Údaje o vytlačovaném materiálu

Vytlačovaný produkt bude sloužit jako přídavný materiál pro svařování. Jako optimální materiál pro tuto aplikaci firma zvolila PA6 s obchodním označením Grilon F50.

Popis produktu [15]

Grilon F50 je vysoko viskózní filmový druh polyamidu 6 pro vyfukování a pro filmové aplikace. Materiál je má vysokou pevnost, tuhost, tažnost a odolnost proti otěru, stejně jako velmi dobrou odolnost proti širokému rozsahu chemikálií, rozpouštědel, olejů a tuků.

Tento materiál je dodáván ve formě granulátu. Materiálový list je přiložen v příloze 1. Součástí materiálového listu je i závislost viskozity na smykové rychlosti (obr. 32). Tato závislost je při vytlačování dosti důležitá.



Obr. 32 Grafická závislost viskozity na smykové rychlosti [15]

Poznámky k sušení:

Kondicionace uvedená výše je pro odvlhčovací sušičku.

Sušicí teplota cirkulační teplovzdušné sušárny: 80°C

Doba sušení cirkulační vzduchové sušárny: 6 až 16 hodin

Sušicí teplota vakuové sušárny: 100°C

Doba sušení vakuové sušárny: 4 až 16 hod



Poznámky k vytlačování:

Výrobce doporučuje univerzální třízónový šnek.

Doporučený kompresní poměr - $2,8:1 \div 3,5:1$

Doporučená délka šneku $24D-25D$

Pro materiál Grilon F50 je doporučen hladký válec ve vstupní sekci. Pro docílení zvýšení specifického výstupního výkonu může být vstupní zóna v délce $2D$ od plnicího otvoru lehce drážkovaná (hloubka drážek max. 0,5mm)

K výpočtům optimalizace geometrie šneku jsou potřebné reologické vlastnosti materiálu. Hlavně tedy viskozita taveniny η , koeficient konzistence K a exponent mocninového zákona n . Tyto vlastnosti byly zjištěny reologickými testy v laboratoři TUL.

3.2.2 Stanovení tokových křivek

Zkouška je provedena dle ČSN EN ISO 1133

Parametry vytlačovacího plastometru Melt Flow tester fy. CEAST S.p.A.:

výška válce	162 mm
vnitřní průměr válce	$9,55 \pm 0,01$ mm
průměr pístní tyče	9,47 mm
délka trysky	$8,000 \pm 0,025$ mm
vnitřní průměr trysky	$2,095 \pm 0,050$ mm
dráha pohybu pístu v průběhu měření	25,4 mm

Před měřením byl materiál kondicionován dle ČSN EN ISO 1110.

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot:

Měření se provedlo pro dvě teploty a to 270°C a 290°C a pro zatížení dle tab. 2 a 3, kterým odpovídají naměřené hodnoty.



Tab. 2 Naměřené hodnoty při teplotě 290°C

Teplota měření: 290°C					
m [kg]	D [s ⁻¹]	τ [Pa]	logD	logτ	μ [Pa.s ⁻¹]
3,80	150,10	34270	2,176381	4,534914	228,317
5,00	211,82	45096	2,325967	4,654138	212,898
8,80	447,49	79376	2,650783	4,899689	177,38
10,00	533,49	90201	2,727126	4,955211	169,078

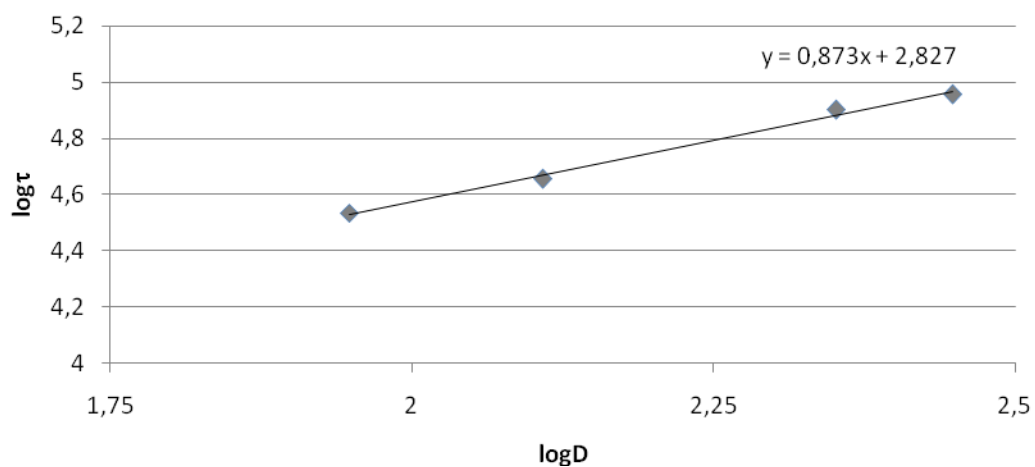
Tab. 3 Naměřené hodnoty při teplotě 270°C

Teplota měření: 270°C					
m [kg]	D [s ⁻¹]	τ [Pa]	logD	logτ	μ [Pa.s ⁻¹]
3,80	88,7	34270	1,947924	4,534914	386,363
5,00	128,27	45096	2,108125	4,654138	351,571
8,80	224,66	79376	2,351526	4,899689	353,314
10,00	280,74	90201	2,448304	4,955211	321,298

Zlogaritmováním hodnot smykové rychlosti a smykového napětí a vytvoření grafické závislosti jsme dostali tokové křivky (obr. 33 a obr. 34).

Výsledné tokové křivky:

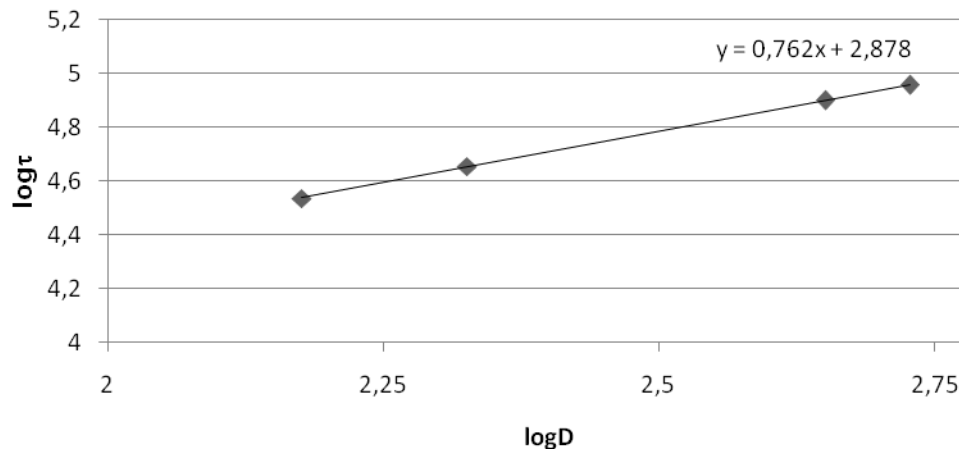
Toková křivka (T=270°C)



Obr. 33 Graf závislosti $\log \tau = f(\log D)$ pro teplotu 270°C



Toková křivka (T=290°C)

Obr. 34 Graf závislosti $\log \tau = f(\log D)$ pro teplotu 290°C

Pro stanovení koeficientů se vychází z redukovaného mocninového zákona:

Vzcházíme ze vztahu pro mocninový zákon $D = \phi \cdot \tau^m$. Po následných dosazeních a upravách dostaneme redukovaný mocninový zákon:

$$\frac{4Q}{\pi R^3} = \frac{4\phi}{m+3} \left(\frac{\Delta p \cdot R}{2L} \right)^m \quad (32)$$

Jednotlivé veličiny mocninového zákona lze tedy odvodit jako

$$D = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad (33)$$

$$\tau = \frac{\Delta p \cdot R}{2L} \quad (34)$$

kde:

D – zdánlivá smyková rychlost na stěně trysky [s^{-1}], τ – smykové napětí [Pa], Q – objemová průtoková rychlost [$m^3 \cdot s^{-1}$], R – poloměr trysky [m], L – délka trysky [m], Δp – tlakový spád po délce trysky [Pa]

Pro stanovení koeficientu konzistence a exponentu n vycházíme z druhého tvaru mocninového zákona:

$$\tau = K \cdot D^n \quad (35)$$



kde:

$K [\text{Pa.s}^n]$ – koeficient konzistence,
 $n [-]$ – exponent mocninového zákona

Pomocí redukovaného mocninového zákona odvodíme vztahy pro smykovou rychlost a smykové napětí. Zlogaritmováním dostaneme rovnici ve tvaru:

$$\log \frac{\Delta p \cdot L}{2R} = \log K + n \cdot \log \frac{4Q}{\pi \cdot R^3} \quad (36)$$

Položíme-li $D = 1$, dostaneme rovnici

$$\log \frac{\Delta p \cdot L}{2R} = \log K \quad (37)$$

Z výsledných závislostí $\log \tau = f(\log D)$ a lineární regrese dostaneme rovnice přímek:

$$\text{Pro teplotu } 270^\circ\text{C je rovnice } y = 0,873x + 2,827 \quad (38)$$

$$\text{Pro teplotu } 290^\circ\text{C je rovnice } y = 0,762x + 2,878 \quad (39)$$

Exponent mocninového zákona n je směrnice přímky.

Koeficient konzistence K jsme stanovili z jednotkové smykové rychlosti $D = 1$.

Dosazením do rovnice $y = 0,873x + 2,827$ za $x = 0$ (resp. $\log D = 0$), vypočítáme hodnotu $y = 2,827$ (resp. $\log \frac{\Delta p \cdot L}{2R} = 2,827$)

$$\log \frac{\Delta p \cdot L}{2R} = 2,827 \Rightarrow \log 2,827 = \log K \Rightarrow K = 10^{2,827} = 671,4$$

Obdobně postupujeme při určení druhé hodnoty koeficientu konzistence.

Exponent mocninového zákona jsme tedy dostali rovnou z rovnic regrese, koeficient konzistence po úpravě a dosazení. Výsledné hodnoty jsou zpracovány v tab. 4:

Tab. 4 Výsledné hodnoty reologický konstant při obou teplotách

t [°C]	n [-]	K [Pa.s ⁿ]
270	0,873	671,4
290	0,762	755,1



3.2.3 Optimalizace geometrie

Jelikož je návrh optimální geometrie šneku pomocí matematického řešení dosti komplikovaná záležitost, při návrhu se postupovalo dle zjištěných a doporučených zásad pro navrhování geometrie šneku pro vytlačování polyamidu. Pouze pro návrh délky kompresní sekce jsou použity empiricky odvozené vztahy, použitelné pro určení délky.

Hlavní důraz byl kladen na úpravu kompresní sekce, hlavně tedy na její délku. Jak již bylo řečeno v kapitole 3.1 je délka této sekce příliš krátká, což způsobuje ucpávání extrudéru.

Je ovšem důležité určit vhodné délky všech tří sekcí tak, aby šnek pracoval co nejlépe.

Pro vytlačování Grilonu F 50 doporučuje výrobce hladký válec ve vstupní sekci. K docílení vyššího specifického konečného výkonu, může být vstupní zóna v délce asi $2D$ od plnicího otvoru lehce drážkovaná (hloubka drážky max. $0.5mm$).

Další doporučené parametry šneku, které výrobce polyamidu poskytl, jsou délka šneku a kompresní poměr.

Délka šneku je výrobcem doporučena $24 \div 25D$

Kompresní poměr je doporučen $2,8:1 \div 3,5:1$

Jelikož šnek se upravuje pro stávající stroj, který je zkonstruovaný pro šneky s délkou $20D$, nemůže být doporučená délka dodržena. Proto bude rozvržení délek šneku na jednotlivé sekce velmi důležité.

Návrh geometrie profilu šnekové drážky:

Při návrhu hloubek kanálů vycházíme z rovnic 8 a 9, jsou to doporučené rovnice pro určení optimální hloubky pro PA. Hloubky kanálů potom budou:

$$H_f = 0,11(D + 25) = 0,11(32 + 25) = 6,27mm$$

$$H_m = 0,04(D + 25) = 0,04(32 + 25) = 2,28mm$$

Doporučený kompresní poměr výrobcem polyamidu je $2,8:1 \div 3,5:1$. Výrobce udává poměr hloubek kanálů.

Pro tyto hodnoty hloubky kanálů vypočteme kompresní poměr z rce.7:

$$X_c = \frac{H_f}{H_m} = \frac{6,27}{2,28} = 2,75$$

Výsledek se nepohybuje v doporučeném rozmezí, proto se musí upravit hodnoty obou rozměrů. Hloubka v dopravní sekci se sníží na 6,2mm, tento rozměr zaokrouhlil dolů a to z bezpečnostního důvodu týkajícího se průřezu jádra. Hloubka kanálu ve výstupní sekci se sníží na 2mm. Toto snížení nijak neohrozí průběh dopravy taveniny polymeru.

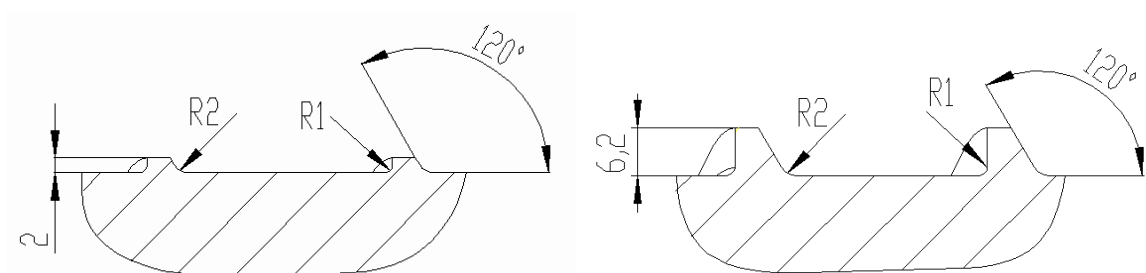
Upravené hodnoty tedy jsou $H_f = 6,2mm$, $H_m = 2mm$ a těmto hodnotám odpovídá kompresní poměr 3,1:1. Tento poměr již vyhovuje doporučenému kompresnímu poměru.

Šířka ramene závitu bude navržena dle zásady pro standardní šneky, tzn., že šířka závitu je $0,1D$.

Šířka závitu je tedy:

$$e = 0,1 \cdot 32 = 3,2mm$$

Kvůli zajištění stabilnějšího procesu a snížení styčné plochy se upravil tvar ramena. Změna geometrie z obdélníkové na lichoběžníkové, sníží sice průřez kanálu, čímž se sníží celkový objem kanálu, avšak na druhou stranu se sníží styčná plocha mezi zátkou a povrchem šneku. To příznivě ovlivní vliv třecích poměrů α a sníží se tak nebezpečí prokluzování.



Průřez kanálu ve výstupní sekci

Průřez kanálu v dopravní sekci

Obr. 35 Geometrie kanálu

Úhel stoupání šroubovice φ bude podle standardu ponechán na $17,66^\circ$.

Určení minimální délky kompresní sekce:

Při stanovení minimální délky kompresní sekce vycházíme z rovnice 30. V této rovnici jsou zahrnuty vlastnosti zpracovávaného plastu a to členem Ω_1 , který uvažuje tyto veličiny:



Rozdíl teplot stěny válce a teploty tání plastu ΔT .

Teplota tání polymeru $T_m = 220^\circ\text{C}$

Teplota stěny válce $T_b = 260^\circ\text{C}$

$$\Delta T_b = T_b - T_m = 260 - 220 = 40^\circ\text{C}$$

Tepečná vodivost PA $k_m = 0,25 \text{ J/ms}^\circ\text{C}$

Hustota pevné látky $\rho_s = 1140 \text{ kg/m}^3$

Hustota taveniny $\rho_m = 970 \text{ kg/m}^3$

Rozdíl entalpií ΔH mezi teplotou pevného lůžka a teplotou tání polymeru.

Entalpie při teplotě tání polymeru je přibližně $H_m = 5E5 \text{ J/kg}$

Protože teplota lůžka není přesně známa, budeme uvažovat entalpii při teplotě 100°C , což činí $3E5 \text{ J/kg}$.

Pak tedy rozdíl entalpií $\Delta H = 5E5 - 3E5 = 2E5 \text{ J/kg}$

Rychlost pohybu pevné látky:

Maximální obvodová rychlost šneku (rce.10):

$$v_0 = \pi DN = \pi \cdot 0,032 \cdot 4,15 = 0,42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost lůžka pevné látky určíme z rce. 29:

$$\begin{aligned} v_{sz} &= \frac{\dot{M}}{\rho_s H_f (\pi D \sin \varphi - pw)} \\ &= \frac{0,011}{1140 \cdot 0,0062 (\pi \cdot 0,032 \cdot \sin 17,66 - 1 \cdot 0,00286)} \\ &= 0,056 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

Hrubý odhad dodávaného objemového množství získáme z rce. 21 se zanedbáním tlakového toku:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= 0,5 \pi D N H (\pi D \sin \varphi \cos \varphi - pw \cos \varphi) \\ &= 0,5 \cdot \pi \cdot 0,032 \cdot 4,15 \\ &\quad \cdot 0,002 (\pi \cdot 0,032 \cdot \sin 17,66 \cdot \cos 17,66 - 1 \cdot 0,00286 \cdot \cos 17,66) \\ &= 0,000011 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \end{aligned}$$

Hmotnostní množství pak dostaneme:

$$\dot{M} = \dot{V} \cdot \rho_m = 0,000011 \cdot 970 = 0,011 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$



Viskozita taveniny polymeru η závisí na lokální smykové rychlosti v kanálu (rce.23). Budeme-li uvažovat teplotu taveniny okolo 270°C, budeme používat reologické konstanty pro tuto teploty, tzn. $n = 0,873$ a $K = 671,4 \text{ Pa.s}^n$.

$$\eta = K \left(\frac{\pi DN}{H} \right)^{n-1} = 671,4 \left(\frac{\pi \cdot 0,032 \cdot 4,15}{0,004} \right)^{0,873-1} = 390 \text{ Pa.s}$$

Po dosazení všech potřebných hodnot:

$$\begin{aligned} \Omega_1 &= \left[\frac{[2k_m \Delta T_b + \eta(v_0^2 + v_{sz}^2 - 2v_0 v_{sz} \cos \varphi)] \rho_m v_0 \sin \varphi}{2\Delta H} \right]^{1/2} \\ &= \left[\frac{[2 \cdot 0,25 \cdot 40 + 390(0,42^2 + 0,056^2 - 2 \cdot 0,42 \cdot 0,056 \cdot \cos 17,66)] 970 \cdot 0,42 \cdot \sin 17,66}{2 \cdot 2 \cdot 10^5} \right]^{1/2} \\ &= 0,163 \end{aligned}$$

Počáteční šířka lůžka pevné látky z rce.28:

$$W_1 = \frac{\pi D \sin \varphi}{p} - w = \frac{\pi \cdot 0,032 \cdot \sin 17,66}{1} - 0,0030 = 0,0276 \text{ m}$$

Kde w je šířka ramene závitu v kolmém směru na kanál:

$$w = e \cdot \cos 17,66 = 0,0030 \text{ m}$$

Kompresní poměr:

$$X_c = 3,1$$

Po dosazení všech potřebných členů dostaneme délku kompresní sekce (rce. 30):

$$\begin{aligned} L_c &> \frac{v_{sz} \rho_s \sqrt{W_1} H_f (X_c - 1) \sin \varphi}{\Omega_1 X_c} \\ &= \frac{0,056 \cdot 1140 \cdot \sqrt{0,0276} \cdot 0,0062 \cdot (3,1 - 1) \sin 17,66}{0,163 \cdot 3,1} \\ &= 0,083 \text{ m} \end{aligned}$$

V násobcích průměru je délka $L_c/D = 0,083/0,032 = 2,6$; tedy $2,6D$.

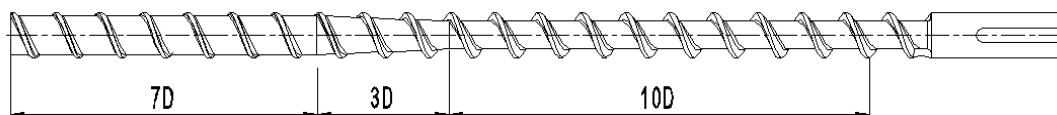
Protože má být délka kompresní sekce větší než $2,6D$, zokrouhlíme délku na $3D$.

Délka vstupní sekce:

Pro stanovení délky dopravní sekce nejsou odvozeny žádné empirické vztahy, proto se musíme řídit pravidly danými pro tuto sekci.

První zásadou je dodržení poměru součinitele tření polymeru na šneku a na válci. Jelikož má polyamid nízký součinitel tření, je nutné použít delší vstupní sekci. Toto je vysvětleno v kapitole 2.3.1.

Délka kompresní sekce tak bude $10D$. Tato délka zajistí dostatečné předání tepla granulátu polymeru v kontaktní ploše s válcem, tudíž se zde zvýší součinitel tření a materiál se nalepí na válec a nebude docházet k prokluzu. To spolu s navrženou lichoběžníkovou geometrií kanálu zajistí stabilní průběh dopravy. V této délce se také vyvine dostatečný tlak pro dopravu materiálu.



Obr. 36 Rozdělení délky optimalizovaného šneku

Délka výstupní sekce:

Po určení délek vstupní a kompresní sekce vychází délka výstupní sekce $7D$. Jelikož se jedná o vytlačování bez přidávání přísad do polymeru, bude tato délka dostačující k zajištění homogenity vytlačované taveniny.

3.3 Výsledné rozměry šneku

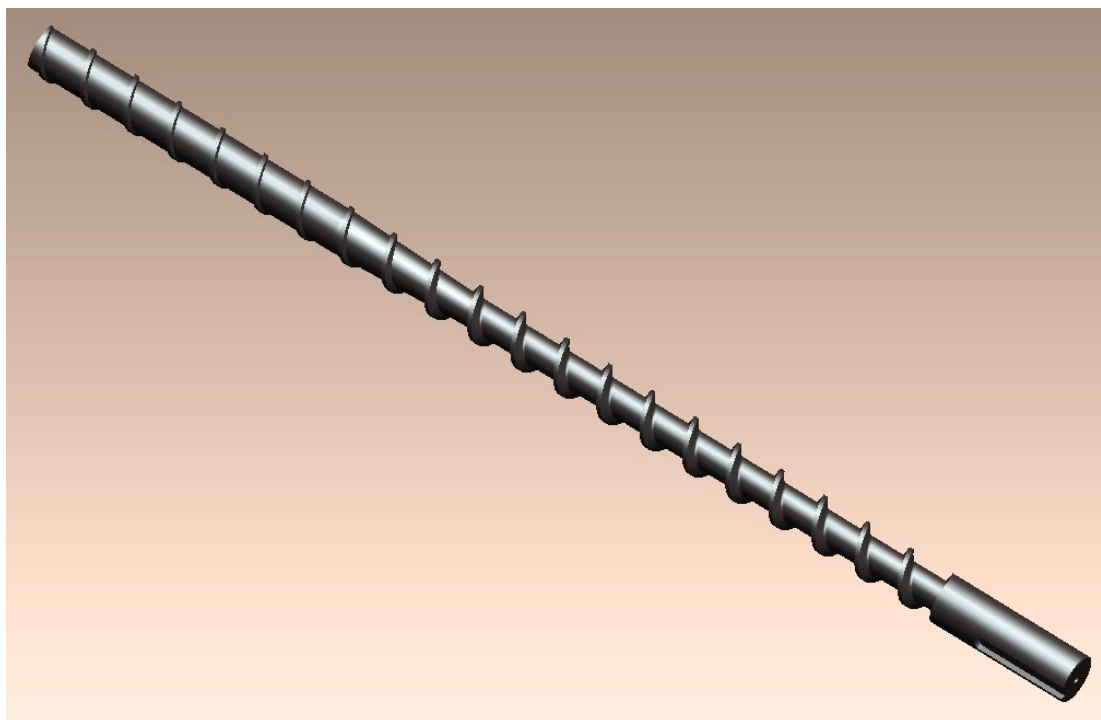
Shrnutí výsledných rozměrů šneku je v tab. 5:



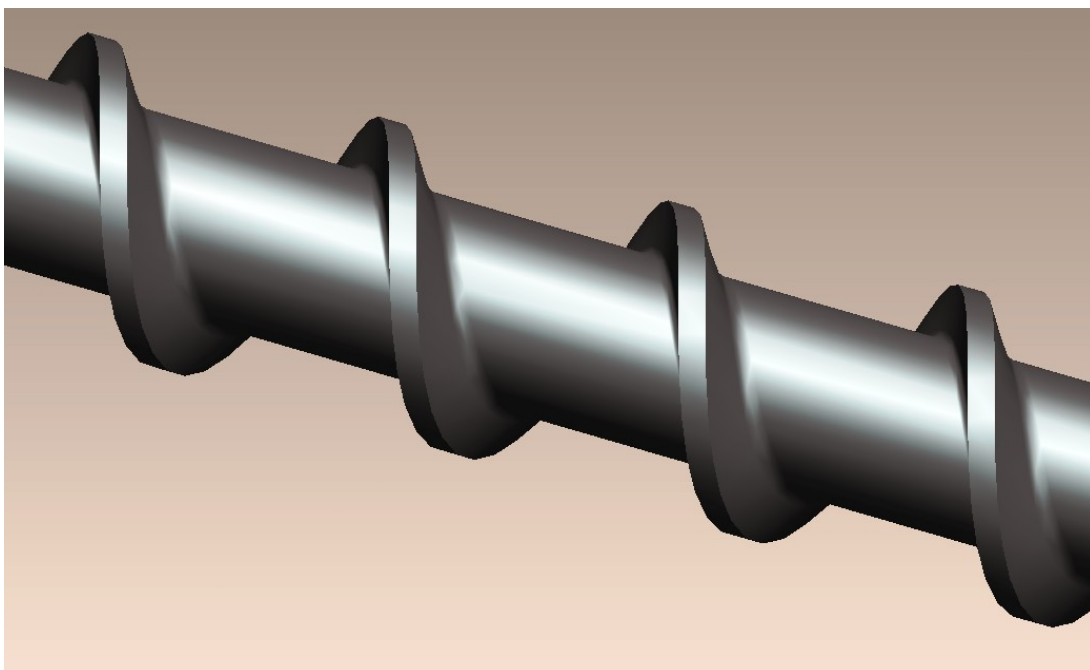
Tab. 5 Rozměry optimalizovaného šneku

Průměr válce	$D = 32\text{mm}$
Celková délka šneku	$L = 20D = 640\text{mm}$
Délka dopravní sekce	$L_f = 10D = 320\text{mm}$
Délka kompresní sekce	$L_k = 3D = 96\text{mm}$
Délka výstupní sekce	$L_m = 7D = 224\text{mm}$
Hloubka dopravní sekce	$H_f = 6,2\text{mm}$
Hloubka výstupní sekce	$H_m = 2\text{mm}$
Šířka závitů	$e = 3,2\text{mm}$
Rozteč	$t = 1D = 32\text{mm}$
Stoupání šroubovice	$\varphi = 17,66^\circ$
Počet chodů šneku	$p = 1$
Kompresní poměr šneku	$X_c = 3,1:1$
Radiální vůle	$\delta = 25\text{ }\mu\text{m}$

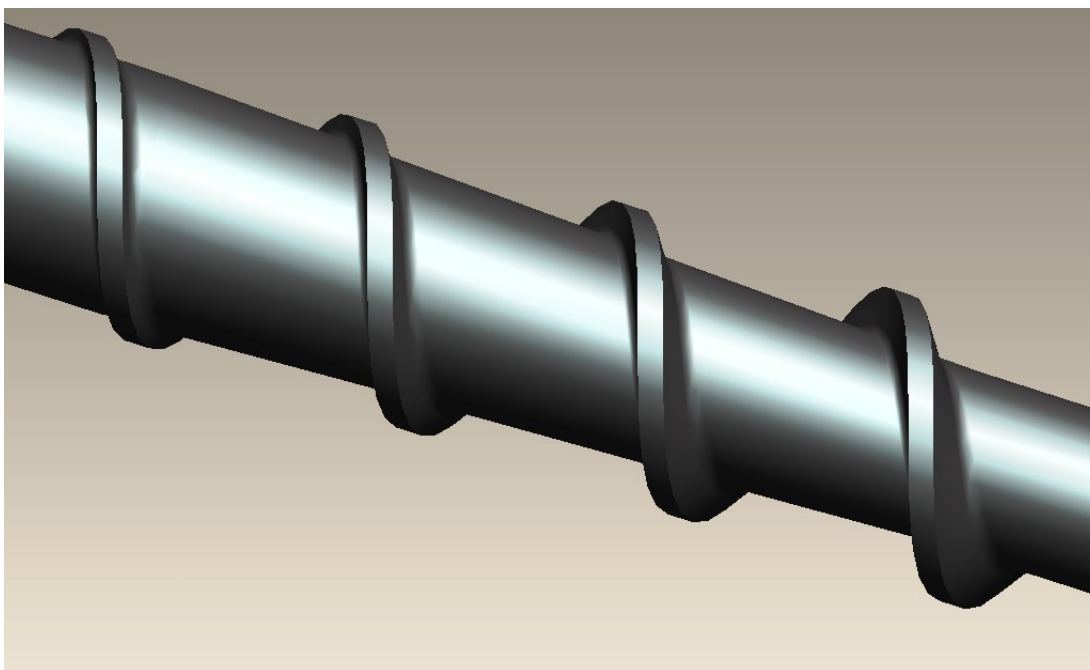
Pro tvorbu výkresu, byl vytvořen model šneku v programu Pro Engineer. Model šneku je ukázán na obr. 37 a detailní pohledy jednotlivých sekcí jsou na obr. 38, 39, 40. Výrobní výkres je v příloze 3.



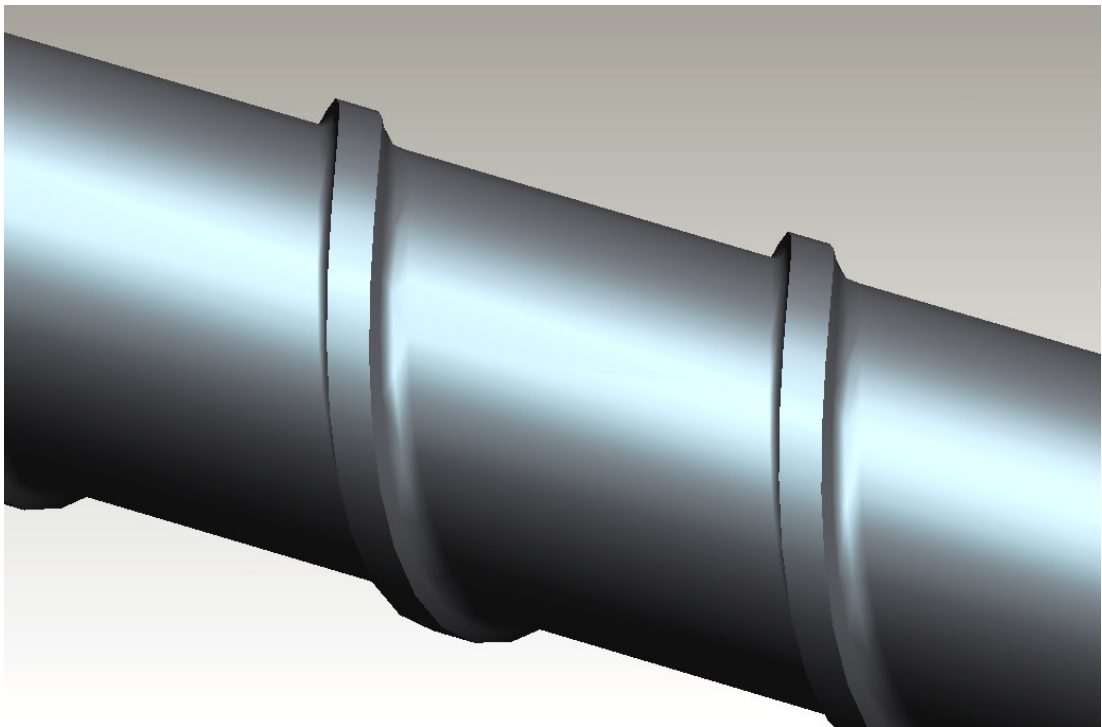
Obr. 37 Model optimalizovaného šneku pro PA



Obr. 38 Vstupní sekce



Obr. 39 Kompresní sekce



Obr. 40 Výstupní sekce

4 Diskuze výsledků

Při návrhu jsme vycházeli ze znalostí o zpracovávaném materiálu. Reologickými testy a stanovením tokových křivek se určily potřebné reologické koeficienty taveniny. Pomocí těchto koeficientů se mohla spočítat viskozita taveniny v extrudéru při daných otáčkách. Polyamid se řadí mezi materiály s nízkou viskozitou, tudíž se jeví jako dobře zpracovatelný materiál. Je však důležité vzít v úvahu jeho úzké teplotní pole zpracovatelnosti. To bude rozhodující při nastavení technologických podmínek vytlačovacího procesu.

Návrh se držel konstrukce standardních šneků, protože tato geometrie se stále ukazuje jako dobré řešení.

Pro dopravu pevné látky je výhodnější používat drážkovaný válec ve vstupní zóně. Výrobce polyamidu však doporučuje pro zpracovávání použít hladký pracovní válec. Drážkování by také nešlo použít z důvodu konstrukčního uspořádání válce.

Jelikož se polyamid řadí mezi materiály s nízkým součinitelem tření, bylo důležité zajistit optimální třecí poměr polymeru s povrchem šneku a válcem. Změnou geometrie šnekového kanálu se snížila styčná plocha šneku s plastem, což vede ke snížení tření. Pro materiály s nízkým součinitelem tření je doporučena také větší délka dopravní sekce a to mezi $8D$ až $10D$. Podle tohoto doporučení je délka sekce navržena $10D$.

Kompresní sekce byla navržena podle empiricky zjištěných matematických rovnic. Tento výpočet byl prováděn s velkou pečlivostí, neboť návrh délky sekce byl pro celkovou optimalizaci nejdůležitější.

Provedení výstupní zóny je také standardní, zaručující dostatečnou homogenitu taveniny. Jelikož šnek bude vytlačovat svařovací dráty, do nichž nebudou přidávána žádná plniva, není třeba mít dlouhou výstupní sekci.

Navržený šnek nemohl být zatím vyzkoušen, neboť ještě probíhá jeho výroba. To znamená, že ověření funkčnosti šneku nemohlo být zatím provedeno. Jelikož byly dodrženy všechny konstrukční zásady pro návrh optimální geometrie, je zde předpoklad správné funkce vytlačovacího stroje při zpracování polyamidu.

5 Závěr

Účelem teoretické části bylo seznámit čtenáře s plastifikační jednotkou vytlačovacího stroje a to jak s konstrukcí, tak i s pochody během zpracování polymeru. Konstrukce je zaměřena na vytlačovací šnek, tzn., že zde byly shrnuty konstrukční zásady navrhování šneku. Optimalizace vytlačovacího stroje byla prováděna pro polyamid. Tomuto plastu byla věnována jedna kapitola, která se zabývala vlastnostmi a potížemi spojenými s vytlačováním tohoto polymeru. Polyamid, jakožto plast, jehož tavenina se blíží Newtonovské tekutině je obecně považován za dobře zpracovatelný.

Z provedených testů bylo zřejmé, že použitý šnek nebude pro zpracování PA vhodný. Problém byl hlavně v jeho krátké kompresní sekci. Výpočtem bylo prokázáno, že krátká výstupní sekce je pro polyamid nepostačující.

V odborných publikacích je často uváděno, že pro zpracování PA je dostačující délka kompresní sekce $1D$. Toto tvrzení nepotvrzuje zkouška učiněná na univerzální stroji, opatřeném šnekem s délkou kompresní sekce právě $1D$. Při návrhu optimální délky této sekce, za pomoci matematického řešení, se dosáhlo výsledku třínásobku průměru šneku. Proto tvrzení o dostačující délce kompresní sekce není zcela správné.

Pro přesnější rozbor pochodů ve šneku byly vyvinuty matematické analýzy dopravy pevné látky, tavení a analýza dopravy taveniny. Jejich řešení však často vede ke složitým kvadratickým rovnicím a ne vždy k jednoznačnému řešení. Tyto analýzy by měly hlavně posloužit jako podklad pro tvorbu počítačových programů, které by poskytovaly optimální návrh geometrie šneku. Je nutné poznamenat, že dodnes neexistuje natolik spolehlivý program, na který by se dalo stoprocentně spolehnout.

Extrudery se optimalizují pro výkonnost (max. dodávku), pro snížení spotřeby příkonu stroje, pro co nejvyšší kvalitu taveniny apod. Tyto požadavky si navzájem odporují. Každý plast má také rozdílné reologické a tepelné vlastnosti, proto není možné navrhnout univerzální šnek, který by byl schopen zpracovávat všechny typy polymerů



Seznam použité literatury

- [1] KREBS, J.: *Teorie zpracování nekovových materiálů* (skripta), TU v Liberci, 2006. ISBN 80-7372-133-3
- [2] KŮSA, P.: *Vliv konstrukce vstupní zóny na výkonové charakteristiky plastikační jednotky vyfukovacího stroje* (Diplomová práce), TU v Liberci, 2003
- [3] RAUWENDAAL, CH.: *Polymer Extrusion*. Hanser, 2001
ISBN 1-56990-321-2
- [4] WHITE, L. J. / POTENTE, H.: *Screw Extrusion*. Hanser, 2003
ISBN 1-56990-317-4
- [5] LENFELD, P.: *Plastics Processing*, TU v Liberci, 2007
ISBN 978-80-7372-282-1
- [6] www.eta-kunststofftechnologie.de (3/2008)
- [7] www.xaloy.com (3/2008)
- [8] www.utb.cz (3/2008)
- [9] www.euroimpex.cz (3/2008)
- [10] www.boco.cz (3/2008)
- [11] www.plasticsportalasia.net (4/2008)
- [12] www.fch.vutbr.cz (3/2008)
- [13] www.devicelink.com (3/2008)
- [14] www.anah-sk.cz (4/2008)
- [15] www.campusplastics.com (4/2008)
- [16] Materiály firmy ANAH + SK s r.o



Seznam příloh

Příloha 1: Materiálový list PA Grilon F50

Příloha 2: Výsledky z měření reologických vlastností

Příloha 3: Výkres šneku

Příloha 1: Materiálový list PA Grilon F50

Materiálový list **PA Grilon F50**:

ASTM a ISO vlastnosti

Fyzikální	Nominalní hodnota	Jednotky	Metoda
Měrná hmotnost	1.14	g/cm ³	ASTM D792
Hustota	1140	kg/m ³	ISO 1183 ²
Objemový index toku taveniny (MVR) (275°C/5.0 kg)	8.00	cm ³ /10min	ISO 1133
Objemový index toku taveniny (275°C/21.6 kg)	45.0	cm ³ /10min	ISO 1133 ²
Absorbce vody (24 hr)	1.7	%	ASTM D570
Absorbce vody	9.0	%	ISO 62 ²
Absorbce vlhkosti	3.0	%	ISO 62 ²
Viskozita	335	cm ³ /g	ISO 307, 1157, 628 ²
Mechanické			
Modul v tahu	2900	MPa	ASTM D638
Modul v tahu	2900	MPa	ISO 527-1
Mez tažnosti	80.0	MPa	ISO 527-1
Deformace v tahu	4.0	%	ISO 527-1
Poměrné prodloužení v tahu (přerušení)	50	%	ASTM D638
Rázové vlastnosti			
Charpyho vrubová houževnatost (23 °C)	6.00	kJ/m ²	ISO 179 /1eA ²
Charpyho vrubová houževnatost (-30 °C)	6.00	kJ/m ²	ISO 179 /1eA ²
Charpyho rázová houževnatost (23 °C)	Nepřeraženo		ISO 179 /1eU ²
Charpy rázová houževnatost (-30 °C)	Nepřeraženo		ISO 179 /1eU ²

Tepelné			
Teplota měknutí dle Vicata (50°C/h 50N)	195	°C	ISO 306 ²
Teplota tání	220	°C	DSC
Teplota tání (10°C/min)	222	°C	ISO 11357-1, -3 ²
Koeficient.lineární teplotní roztažnosti (paralelní)	0.000100	cm/cm/°C	ISO 11359-1, -2 ²
Koeficient.lineární teplotní roztažnosti (obvyčejný)	0.000100	cm/cm/°C	ISO 11359-1, -2 ²

Informace k procesu

Vytlačování	Nominální hodnota	Jednotky
Teplota sušení	80.0	°C
Délka sušení	4.0 až 16	hod
Doporučená max. vlhkost	0.10	%
Teplota pod násypkou	40	°C
Teplota 1. zóny válce	240	°C
Teplota 2. zóny válce	250	°C
Teplota 3. zóny válce	250	°C
Teplota 4. zóny válce	250	°C
Teplota ve výstupní sekci	260	°C
Teplota hlavy	240	°C

Příloha 2: Výsledky z měření reologických vlastností

MELT FLOW TESTER

CEAST S.p.A – ITALY

Test číslo	.....	30100
Kód materiálu	.....	00
Číslo přístroje	.....	00

Zkušební podmínky

Hustota	[g/cm ³]	.....	1.000
Teplota	[°C]	.....	270.0
Zatížení	[kg]	.....	3.800
Průměr trysky	[mm]	.....	2.095
Délka trysky	[mm]	.....	8.00
Délka měření	[mm]	.....	25.00

VÝSLEDKY ZKOUŠKY

Objemový index toku taveniny [cm³/10min]

01	45.336	02	46.379	03	47.476	04	48.369	05	48.855
06	48.955	07	48.664	08	48.651	09	48.881	10	48.799

MVR průměr [cm³/10min] ... 48.037

Standardní odchylka [cm³/10min] ... 1.249

REOLOGICKÁ DATA

Smyková rychlost	[1/s]	.....	88.700
Smykové napětí	[Pa]	.....	34270
Viskozita	[Pa*s]	.....	386.363

Komentář

Operátor

Čt 24/4/008 14:42

MELT FLOW TESTER

CEAST S.p.A – ITALY

Test číslo	.....	30100
Kód materiálu	.....	00
Číslo přístroje	.....	00

Zkušební podmínky

Hustota	[g/cm ³]	.....	1.000
Teplota	[°C]	.....	270.0
Zatížení	[kg]	.....	5.000
Průměr trysky	[mm]	.....	2.095
Délka trysky	[mm]	.....	8.00
Délka měření	[mm]	.....	25.00

VÝSLEDKY ZKOUŠKY

Objemový index toku taveniny [cm³/10min]

01	68.677	02	68.821	03	68.916	04	69.053	05	69.232
06	69.635	07	69.903	08	70.033	09	70.115	10	70.237

MVR průměr [cm³/10min] ... 69.462

Standardní odchylka [cm³/10min] ... 0.589

REOLOGICKÁ DATA

Smyková rychlost [1/s] 128.270

Smykové napětí [Pa] 45096

Viskozita [Pa*s] 351.571

Komentář

Operátor

Čt 24/4/008 13:47

MELT FLOW TESTER

CEAST S.p.A – ITALY

Test číslo	.....	30100
Kód materiálu	.....	00
Číslo přístroje	.....	00

Zkušební podmínky

Hustota	[g/cm ³]	.....	1.000
Teplota	[°C]	.....	270.0
Zatížení	[kg]	.....	8.800
Průměr trysky	[mm]	.....	2.095
Délka trysky	[mm]	.....	8.00
Délka měření	[mm]	.....	25.00

VÝSLEDKY ZKOUŠKY

Objemový index toku taveniny [cm³/10min]

01	118.805	02	119.053	03	119.754	04	120.649	05	121.196
06	122.500	07	122.894	08	123.778	09	123.389	10	124.683

MVR průměr [cm³/10min] ... 121.670

Standardní odchylka [cm³/10min] ... 2.073

REOLOGICKÁ DATA

Smyková rychlost [1/s] 224.660

Smykové napětí [Pa] 79376

Viskozita [Pa*s] 353.314

Komentář

Operátor

Čt 24/4/008 14:07

MELT FLOW TESTER

CEAST S.p.A – ITALY

Test číslo	.....	30100
Kód materiálu	.....	00
Číslo přístroje	.....	00

Zkušební podmínky

Hustota	[g/cm ³]	.....	1.000
Teplota	[°C]	.....	270.0
Zatížení	[kg]	.....	10.000
Průměr trysky	[mm]	.....	2.095
Délka trysky	[mm]	.....	8.00
Délka měření	[mm]	.....	25.00

VÝSLEDKY ZKOUŠKY

Objemový index toku taveniny [cm³/10min]

01	142.312	02	147.337	03	150.029	04	150.133	05	152.707
06	153.478	07	155.046	08	155.174	09	157.603	10	156.587

MVR průměr [cm³/10min] ... 152.041

Standardní odchylka [cm³/10min] ... 4.684

REOLOGICKÁ DATA

Smyková rychlost	[1/s]	.....	280.740
Smykové napětí	[Pa]	.....	90201
Viskozita	[Pa*s]	.....	321.298

Komentář

Operátor

Čt 24/4/008 14:30

MELT FLOW TESTER

CEAST S.p.A – ITALY

Test číslo	.....	30100
Kód materiálu	.....	00
Číslo přístroje	.....	00

Zkušební podmínky

Hustota	[g/cm ³]	.....	1.000
Teplota	[°C]	.....	290
Zatížení	[kg]	.....	3.800
Průměr trysky	[mm]	.....	2.095
Délka trysky	[mm]	.....	8.00
Délka měření	[mm]	.....	25.00

VÝSLEDKY ZKOUŠKY

Objemový index toku taveniny [cm³/10min]

01	77.928	02	78.783	03	79.836	04	80.251	05	80.858
06	81.542	07	82.309	08	83.164	09	83.873	10	84.240

MVR průměr [cm³/10min] ... 81.278

Standardní odchylka [cm³/10min] ... 2.133

REOLOGICKÁ DATA

Smyková rychlost	[1/s]	.....	150.100
Smykové napětí	[Pa]	.....	34270
Viskozita	[Pa*s]	.....	228.317

Komentář

Operátor

Čt 24/4/008 15:44

MELT FLOW TESTER

CEAST S.p.A – ITALY

Test číslo	.....	30100
Kód materiálu	.....	00
Číslo přístroje	.....	00

Zkušební podmínky

Hustota	[g/cm ³]	.....	1.000
Teplota	[°C]	.....	290.0
Zatížení	[kg]	.....	5.000
Průměr trysky	[mm]	.....	2.095
Délka trysky	[mm]	.....	8.00
Délka měření	[mm]	.....	25.00

VÝSLEDKY ZKOUŠKY

Objemový index toku taveniny [cm³/10min]

01	110.885	02	111.117	03	112.442	04	113.476	05	114.940
06	115.357	07	115.948	08	117.235	09	117.682	10	118.048

MVR průměr [cm³/10min] ... 114.713

Standardní odchylka [cm³/10min] ... 2.637

REOLOGICKÁ DATA

Smyková rychlost [1/s] 211.820

Smykové napětí [Pa] 45096

Viskozita [Pa*s] 212.898

Komentář

Operátor

Čt 24/4/008 15:12

MELT FLOW TESTER

CEAST S.p.A – ITALY

Test číslo	.....	30100
Kód materiálu	.....	00
Číslo přístroje	.....	00

Zkušební podmínky

Hustota	[g/cm ³]	.....	1.000
Teplota	[°C]	.....	290.0
Zatížení	[kg]	.....	8.800
Průměr trysky	[mm]	.....	2.095
Délka trysky	[mm]	.....	8.00
Délka měření	[mm]	.....	25.00

VÝSLEDKY ZKOUŠKY

Objemový index toku taveniny [cm³/10min]

01	228.432	02	232.908	03	234.255	04	239.674	05	241.843
06	246.130	07	245.788	08	248.714	09	253.210	10	252.320

MVR průměr [cm³/10min] ... 242.327

Standardní odchylka [cm³/10min] ... 8.431

REOLOGICKÁ DATA

Smyková rychlost	[1/s]	.....	447.490
Smykové napětí	[Pa]	.....	79376
Viskozita	[Pa*s]	.....	177.380

Komentář

Operátor

Čt 24/4/008 15:22

MELT FLOW TESTER

CEAST S.p.A – ITALY

Test číslo	.....	30100
Kód materiálu	.....	00
Číslo přístroje	.....	00

Zkušební podmínky

Hustota	[g/cm ³]	.....	1.000
Teplota	[°C]	.....	290.0
Zatížení	[kg]	.....	8.800
Průměr trysky	[mm]	.....	2.095
Délka trysky	[mm]	.....	8.00
Délka měření	[mm]	.....	25.00

VÝSLEDKY ZKOUŠKY

Objemový index toku taveniny [cm³/10min]

01	281.612	02	283.702	03	287.151	04	288.904	05	287.351
06	291.859	07	286.752	08	294.059	09	291953	10	295.776

MVR průměr [cm³/10min] ... 288.912

Standardní odchylka [cm³/10min] ... 4.499

REOLOGICKÁ DATA

Smyková rychlost [1/s] 533.490

Smykové napětí [Pa] 90201

Viskozita [Pa*s] 169.078

Komentář

Operátor

Čt 24/4/008 15:37

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci dne 23. května 2008

.....
Podpis

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. Applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

In Liberec, on 23th May 2008

.....
Signature